



Carlos Daniel Fuzeta Catarino

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Monitorização *online* do processo WAAM através de análise acústica

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor João Pedro de Sousa Oliveira,
Professor Auxiliar Convidado, Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos,
Professor Associado com Agregação, Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2019

Carlos Daniel Fuzeta Catarino

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Monitorização *online* do processo
WAAM através de análise acústica**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor João Pedro de Sousa Oliveira,
Professor Auxiliar Convidado, Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos,
Professor Associado com Agregação, Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Setembro, 2019

Monitorização online do processo WAAM através de análise acústica

Copyright © Carlos Daniel Fuzeta Catarino, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus Pais

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor João Oliveira, pela oportunidade que me proporcionou para desenvolver este tema e por todo o apoio, disponibilidade e orientação prestados ao longo do desenvolvimento do mesmo.

Em segundo lugar, ao meu co-orientador, Professor Telmo Santos pela ajuda na discussão das problemáticas relacionadas com a abordagem a seguir, equipamento a utilizar e nas ferramentas necessárias para análise dos resultados experimentais.

Os meus sinceros agradecimentos ao Valdemar Duarte e Tiago Rodrigues por toda a disponibilidade prestada durante o desenvolvimento da componente experimental, bem como pela orientação e esclarecimento de dúvidas sobre os mais diversos assuntos relacionados com a temática

Deixo o meu agradecimento, em particular, ao meu colega Tiago Pratas pelo interesse e disponibilidade que sempre demonstrou para me ajudar na resolução de problemas relacionados com o meu tema e no auxílio de questões relacionadas com a redação do documento, salientando que ele se encontrava também em desenvolvimento de uma dissertação de mestrado de uma área e temática diferentes.

A todos os meus amigos e colegas gostaria de agradecer pela amizade que foi crescendo, para alguns, ao longo destes 5 anos e para outros, ao longo de grande parte da minha vida. Apesar de nem todos terem um papel ativo no desenvolvimento da minha dissertação, sinto que todos foram fundamentais para a conclusão desta jornada académica. Especial agradecimento para o Francisco Henriques, Manuel Madeira, Diogo Vitorino, Gonçalo Garcia, Rafael Ribeiro, Miguel Malcato, Fábio Rodrigues e Flávio Ribeiro.

Devo exprimir também o meu especial agradecimento à Catarina Pacheco pela paciência, companheirismo, apoio, lealdade e força oferecidos durante este longo período, que espero vir a contar para o futuro.

Por último, quero agradecer aos meus pais, António e Rosa, pelo carinho, apoio, compreensão, motivação e sobretudo pelos sacrifícios feitos por eles ao longo de toda a minha vida no sentido de me proporcionarem as melhores condições e educação possível. Sem eles, chegar até aqui, seria impossível.

Resumo

Atualmente, a Fabricação Aditiva começa a ganhar uma posição relevante na produção de peças metálicas com diversas dimensões e geometrias. Por esse motivo, têm sido desenvolvidos estudos no sentido de otimizar o processo, especialmente nas vertentes que optam pelas tecnologias de soldadura que utilizam arco elétrico como fonte de calor e consumíveis em forma de fio, pois estes são de fácil utilização, permitem elevadas taxas de deposição e ainda custos de fabricação e manutenção reduzidos quando comparados com os restantes processos aditivos. Dada a natureza deste processo e considerando o seu enquadramento na 4ª Revolução Industrial (Indústria 4.0), têm-se reunido esforços para aplicar métodos *online* de ensaios não destrutivos.

No âmbito do tema, este trabalho visa testar a viabilidade da deteção de defeitos, através da análise acústica, em componentes produzidos pela Fabricação Aditiva por Arco e Arame, ou em inglês, *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM).

Foram produzidas várias paredes de 150 mm compostas por 1 ou 10 camadas, utilizando diferentes parâmetros que produziram baixa, intermédia e elevada entrega térmica. Nesses ensaios foram impostos defeitos do tipo falha de gás de proteção e impurezas no substrato, situados em diferentes camadas.

Através desta metodologia foi possível monitorizar o processo, onde se constatou a formação do arco elétrico através dos picos de pressão sonora. Consequentemente, obtiveram-se resultados promissores na deteção dos defeitos impostos, especialmente nos do tipo falha de gás de proteção. Percebeu-se, ainda, a influência do número de camadas e da utilização de diferentes parâmetros no som produzido.

Palavras-chave: fabricação aditiva, WAAM, soldadura, ensaios não destrutivos, monitorização *online*.

Abstract

Today, Additive Manufacturing has a very important place in the production of metal parts with different dimensions and geometries. Studies have been developed to optimize the process, especially in the welding technologies that use electric arc as a heat source and wire consumables, once these are easy to use, allow high deposition rates and reduced manufacturing and maintenance costs. Given the nature of this process and considering its framework in the 4th Industrial Revolution (Industry 4.0), efforts have been stepped up to apply online non-destructive testing methods.

In this context, this work aims at testing the viability of defect detection through acoustic analysis in components produced by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM).

Several 150 mm walls composed by 1 or 10 layers were produced using different parameters which produced low, intermediate and high thermal deliver. In these tests, defects of shielding gas failure and impurities in the substrate were placed in different layers.

In the end it was possible to monitor the process with accuracy, where it was found the formation of the electric arc through the sound pressure peaks. Consequently, good results were obtained in the detection of the imposed defects, especially in the shielding gas failure type. It was also noticed the influence of the number of layers and the use of different parameters in the sound produced.

Keyword: additive manufacturing, WAAM, welding, non-destructive testing, online monitoring.

Índice Geral

Capítulo 1. Introdução	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura.....	2
Capítulo 2. Revisão da Literatura	3
2.1. Fabricação Aditiva	3
2.2. <i>Wire and Arc Additive Manufacturing</i>	5
2.2.1. Contextualização Histórica	5
2.2.2. Processo	5
2.2.3. Vantagens.....	6
2.2.4. Desvantagens.....	6
2.3. Ensaio Não Destrutivo.....	7
2.5. Aplicação de NDT na Soldadura.....	8
2.5.1. Soldadura GMAW	8
2.5.2. Sinal Sonoro	10
2.6. Captação do Sinal Sonoro.....	12
2.6.1. Microfones Piezoelétricos.....	12
2.6.2. Microfones Capacitivos	13
2.6.3. Microfones Dinâmicos.....	13
2.6.4. Padrões Polares dos Microfones.....	14
2.7. Processamento de Sinal	15
2.7.1. Transformada Rápida de Fourier.....	16
2.7.2. Transformada de Fourier de Curto Termo	18
Capítulo 3. Procedimento Experimental	21
3.1. Equipamento	21
3.1.1. Seleção de Componentes	21
3.1.2. Desenvolvimento de Componentes	22
3.1.3. Montagem Experimental.....	24
3.2. Metodologia	25

Capítulo 4. Exposição e Discussão de Resultados	29
4.1. Ensaios Preliminares	29
4.2. Monitorização <i>Online</i>	36
4.2.1. Validação de Resultados	36
4.2.2. Detecção de Defeitos	37
4.2.3. Influência dos Parâmetros do Processo e da Sobreposição de Camadas no Som	55
Capítulo 5. Conclusões e Trabalho Futuro.....	61
Referências	63

Índice de Figuras

Figura 2.1: Ordem hierárquica das diferentes vertentes de Fabricação Aditiva.....	4
Figura 2.2: Representação esquemática do processo WAAM.	5
Figura 2.3: Posicionamento dos diferentes modos de transferência de material em função da corrente e tensão na soldadura GMAW (Adaptado de [22]).	9
Figura 2.4: Representação da corrente elétrica na soldadura ao longo das diferentes fases do processo de GMAW em modo de transferência Curto-circuito (Adaptado de [23]).	11
Figura 2.5: Esquema ilustrativo de um microfone piezoelétrico (Adaptado de [29]). ...	12
Figura 2.6: Esquema ilustrativo de um microfone capacitivo (Adaptado de [33]).	13
Figura 2.7: Esquema ilustrativo de um microfone dinâmico (Adaptado de [35]).	14
Figura 2.8: Três diferentes ondas harmônicas (ondas a cor vermelha, azul e laranja) e a onda resultante da soma das mesmas (onda a cor verde).	16
Figura 2.9: a) Onda harmônica ao longo do referencial xy . b) Representação de uma onda harmônica ao longo do círculo trigonométrico.	17
Figura 2.10: a) Representação de uma onda harmônica no círculo trigonométrico. b) Representação no referencial xy do comprimento do vetor entre o centro do círculo trigonométrico e o centro geométrico das diferentes formas originadas pela representação de uma onda harmônica no círculo trigonométrico para as várias frequências angulares.	18
Figura 2.11: Representação esquemática do princípio de funcionamento da STFT.	19
Figura 3.1: Braço rígido (dimensões gerais).	23
Figura 3.2: a) Posicionamento da ligação móvel, eixos respetivos e vista de aproximação. b) Vista explodida e identificação dos dois componentes principais.	23
Figura 3.3: Perspetiva geral do posicionamento do microfone e vista de aproximação.	24
Figura 3.4: Circuito do redutor de tensão (Adaptado de [15]).	24
Figura 3.5: Esquema da montagem experimental.	25
Figura 4.1: Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo à deposição de um cordão de referência.	29
Figura 4.2: a) Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo ao movimento no eixo Y. b) Vista de aproximação do intervalo de tempo [2; 4] s.	29
Figura 4.3: a) Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo ao movimento no eixo Z. b) Vista de aproximação do intervalo de tempo [2; 4] s.	30
Figura 4.4: a) Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo ao funcionamento do exaustor. b) Vista de aproximação do intervalo de tempo [2; 4] s.	30
Figura 4.5: a) Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo ao movimento da extrusora. b) Vista de aproximação do intervalo de tempo [2; 4] s.	31
Figura 4.6: a) Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo ao gás de proteção a ser libertado. b) Vista de aproximação do intervalo de tempo [2; 4] s.	31

Figura 4.7: a) Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo a todos os sistemas em funcionamento sem criação de arco elétrico. b) Vista de aproximação do intervalo de tempo [2; 4] s.....	32
Figura 4.8: Gráfico STFT do sinal sonoro correspondente ao movimento no eixo Y....	33
Figura 4.9: Gráfico STFT do sinal sonoro correspondente ao movimento no eixo Z.	33
Figura 4.10: Gráfico STFT do sinal sonoro correspondente ao funcionamento do exaustor.	34
Figura 4.11: Gráfico STFT do sinal sonoro correspondente ao movimento da extrusora.	34
Figura 4.12: Gráfico STFT do sinal sonoro correspondente ao gás de proteção a ser libertado.....	35
Figura 4.13: Gráfico STFT do sinal sonoro correspondente a todos os sistemas em funcionamento sem a criação de arco elétrico.....	35
Figura 4.14: a) Comparação dos sinais de tensão elétrica e pressão sonora do ensaio HH1. b) Vista de aproximação (intervalo [3.1; 3.3] s).....	36
Figura 4.15: Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo ao ensaio HH1.	37
Figura 4.16: Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo ao ensaio HH2.	37
Figura 4.17: Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo ao ensaio HH3.	38
Figura 4.18: a) Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo ao ensaio HH3. b) Gráfico FFT do intervalo de tempo [10 ; 10.5] (gráfico a cor verde). c) Gráfico FFT do intervalo de tempo [30 ; 30.5] (gráfico a cor vermelha).	39
Figura 4.19: Gráfico STFT e vista de cima do cordão do ensaio HH1.....	40
Figura 4.20: Gráfico STFT e vista de cima do cordão do ensaio HH2.....	40
Figura 4.21: Gráfico STFT e vista de cima do cordão do ensaio HH3.....	41
Figura 4.22: Gráfico STFT da deposição da 5ª camada, vista de cima do cordão e respetiva amostra do ensaio HH8.5.	42
Figura 4.23: Gráfico STFT da deposição da 5ª camada, vista de cima do cordão e respetiva amostra do ensaio HH9.5.	43
Figura 4.24: Gráfico STFT do ensaio HH4.....	44
Figura 4.25: Gráfico STFT do ensaio HH5.....	44
Figura 4.26: Gráfico STFT do ensaio HH6.....	44
Figura 4.27: Gráfico STFT do ensaio HH10.5.	45
Figura 4.28: a) Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo ao ensaio HH12.10. b) Gráfico FFT do intervalo de tempo [4 ; 4.5] (gráfico a cor verde). c) Gráfico FFT do intervalo de tempo [24 ; 24.5] (gráfico a cor vermelha).	46
Figura 4.29: Gráfico FFT do intervalo de tempo [5 ; 5.5] s do sinal sonoro relativo ao ensaio HH7.10.	47
Figura 4.30: Gráfico FFT do intervalo de tempo [10 ; 10.5] s do sinal sonoro relativo ao ensaio HH7.10.	47

Figura 4.31: Gráfico FFT do intervalo de tempo [20 ; 20.5] s do sinal sonoro relativo ao ensaio HH7.10.	47
Figura 4.32: Gráfico FFT do intervalo de tempo [30 ; 30.5] s do sinal sonoro relativo ao ensaio HH7.10.	47
Figura 4.33: Gráfico STFT e vista de cima da parede do ensaio HH10.10.	48
Figura 4.34: Gráfico STFT e vista de cima da parede do ensaio HH11.10.	48
Figura 4.35: Gráfico STFT e vista de cima da parede do ensaio HH12.10.	49
Figura 4.36: a) Amostra do ensaio HH12. b) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (100 µm). c) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (50 µm). d) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (100 µm). e) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (50 µm).	50
Figura 4.37: a) Amostra do ensaio HH10. b) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (100 µm). c) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (50 µm). d) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (100 µm). e) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (50 µm).	51
Figura 4.38: a) Amostra do ensaio HH11. b) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (100 µm). c) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (50 µm). d) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (100 µm). e) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (50 µm).	51
Figura 4.39: Gráfico STFT, vista de cima do cordão e respetiva amostra do ensaio LH8.5.	52
Figura 4.40: Gráfico STFT, vista de cima do cordão e respetiva amostra do ensaio LH9.5.	53
Figura 4.41: a) Amostra do ensaio LH10. b) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (100 µm). c) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (50 µm). d) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (100 µm). e) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (50 µm).	54
Figura 4.42 a) Amostra do ensaio LH11. b) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (100 µm). c) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (50 µm). d) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (100 µm). e) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (50 µm).	54
Figura 4.43: a) Amostra do ensaio LH12. b) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (100 µm). c) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (50 µm). d) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (100 µm). e) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (50 µm).	55
Figura 4.44: a) Cordão correspondente ao ensaio LH1. b) Cordão correspondente ao ensaio HH1.	60

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Vantagens e Desvantagens do processo de Fabricação Aditiva (Adaptado de [4]).....	3
Tabela 2.2: Tipos de Microfones (Adaptado de [36]).....	14
Tabela 3.1: Lista de equipamento e respectivas características.	21
Tabela 3.2: Tabela de ensaios experimentais.	26
Tabela 3.3: Parâmetros dos ensaios experimentais.....	26
Tabela 4.1: Gráficos STFT dos ensaios LH1, LH7.1, MH1.1, HH1 e HH7.1.	56
Tabela 4.2: Gráficos STFT dos ensaios LH7.2, LH7.5, LH7.9, HH7.2, HH7.5 e HH7.9.	58

Simbologia e Notações

Latim

A	Amplitude de uma onda harmónica
f	Frequência de oscilação
$f(t)$	Função f definida no tempo
$\hat{f}(\omega)$	Transformada de Fourier da função $f(t)$
N	Número de pontos recolhidos
n	Ponto recolhido
p	Pressão sonora
t	Tempo
t_n	Instante de tempo correspondente ao ponto n
x	Variável de posição
y	Variável de posição
z	Variável de posição

Grego

λ	Comprimento de onda
ω	Frequência angular

Abreviaturas

3D	<i>Three-dimensional</i>
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BJ	<i>Binder Jetting</i>
DED	<i>Directed Energy Deposition</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
ME	<i>Material Extrusion</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MJ	<i>Material Jetting</i>
NDT	<i>Non-destructive Testing</i>
PBF	<i>Powder Bed Fusion</i>

PLA	<i>Polylactic Acid</i>
SL	<i>Sheet Lamination</i>
STFT	<i>Short-Time Fourier Transform</i>
VP	<i>Vat Photopolymerization</i>
WAAM	<i>Wire and Arc Additive Manufacturing</i>

Capítulo 1. Introdução

1.1. Motivação

A Fabricação Aditiva ou, em inglês, *Additive Manufacturing* (AM), é um processo recentemente implementado na indústria. No entanto, tem vindo a ganhar cada vez mais relevância na produção dos mais variados componentes.

Contrariamente aos processos convencionais, que se baseiam na remoção de material para dar origem à geometria pretendida, a fabricação aditiva consiste na criação de um determinado componente através da deposição incremental de material, característica essa que permite, não só dar origem a protótipos, como também a peças que irão para além de uma função representativa. Grande parte dos componentes originados por fabricação aditiva são produzidos através de materiais metálicos devido às suas propriedades mecânicas. Uma das vertentes capaz de as produzir é o processo WAAM, que combina as novas tecnologias de robotização com a tecnologia já existente na área da soldadura.

Para validar determinadas condições admitidas na fase de projeto, de qualquer componente que irá desempenhar uma função de relativa importância, existem os ensaios não destrutivos que, para além de monitorizarem determinadas características, mantêm a integridade do objeto, permitindo a sua futura utilização.

No âmbito do processo WAAM, podem-se esperar defeitos do tipo poros, fissuras, deformações, oxidação, delaminações e mau acabamento superficial que estarão sempre associados a um mau planeamento do percurso da fonte de calor, à não verificação dos parâmetros do processo ou relacionados com a interação indesejada com elementos externos [1].

Neste sentido e tendo em conta a característica da AM anteriormente referida, reúnem-se os esforços para estudar e implementar técnicas de ensaios não destrutivos aplicados a este processo que consigam fazer a monitorização simultaneamente com o fabrico da peça.

1.2. Objetivos

Pretende-se com este trabalho estudar a viabilidade da detecção *online* de eventuais defeitos em componentes produzidos através da tecnologia WAAM através da monitorização acústica.

Uma vez que o princípio de funcionamento deste processo tem por base as técnicas desenvolvidas na área soldadura e que existem estudos que comprovam a utilidade da captação do som para a detecção de defeitos no mesmo, procurou-se aplicar este método na manufatura aditiva por arame e arco.

Em síntese, os objetivos desta dissertação podem-se apresentar da seguinte forma:

- Identificar a ocorrência de alterações no som quando se impõem defeitos na deposição de material.
- Associar diferentes defeitos às variações ocorridas no espectro sonoro.
- Perceber as diferenças ocorridas entre o som proveniente da deposição de uma, e mais que uma camada.
- Estudar a influência dos parâmetros do processo de fabrico no som.

1.3. Estrutura

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, organizados da seguinte forma:

- No capítulo 1 apresentam-se os motivos que levaram ao desenvolvimento desta dissertação e definem-se os objetivos.
- O capítulo 2 diz respeito ao estado de arte deste tema, onde são expostos todos os conceitos teóricos necessários para o desenvolvimento do mesmo.
- Dentro do capítulo 3 encontra-se toda o procedimento experimental, desde a seleção e conceção de componentes à metodologia adaptada.
- No Capítulo 4 discutem-se e exibem-se os resultados experimentais.
- Por último, no capítulo 5 retiram-se as conclusões e planeia-se o trabalho futuro.

Capítulo 2. Revisão da Literatura

2.1. Fabricação Aditiva

De acordo com a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), a Fabricação Aditiva entende-se como o processo que consiste em juntar materiais para produzir determinado objeto, tipicamente camada a camada, através da informação proveniente de um modelo virtual 3D [2]. No entanto, esta tecnologia poderá ser classificada tendo em conta a sua natureza. As categorias identificadas de acordo com a ASTM são [3]:

- *Binder Jetting* (BJ)
- *Directed Energy Deposition* (DED)
- *Material Extrusion* (ME)
- *Material Jetting* (MJ)
- *Powder Bed Fusion* (PBF)
- *Sheet Lamination* (SL)
- *Vat Photopolymerization* (VP)

Sendo este um processo inovador, vem oferecer ainda um conjunto de vantagens tais como permitir uma maior customização dos objetos a fabricar, na medida em que o custo de produção de uma peça se mantém independente do número de vezes que a mesma é fabricada. Por outro lado, essa mesma característica faz com que não exista margem para otimização do tempo de produção, uma vez que o mesmo também se mantém constante para todas as peças. Na Tabela 2.1 encontram-se as vantagens e desvantagens desta tecnologia.

Tabela 2.1: Vantagens e Desvantagens do processo de Fabricação Aditiva (Adaptado de [4]).

Vantagens	Desvantagens
• Fabricação de componentes complexos sem necessitar de moldes	• Dimensão das peças limitada pelo tamanho das máquinas
• Algumas variantes do processo não necessitam de processos de fabrico posteriores	• Algumas variantes do processo apresentam baixos níveis de produção
• Possibilidade de fazer alterações no <i>design</i> do componente sem necessitar de alterações na linha de montagem	• Algumas variantes do processo necessitam de processos de fabrico posteriores

- Produção de *designs* que por outros processos teriam de ser produzidos em mais que uma peça para posteriormente serem conectados
- Menor desperdício de material e menor necessidade de matéria prima
- Economização de produções de pequena escala
- Potencial para cadeias de abastecimento mais simples, prazos de entrega mais curtos e menor acumulação de *stock*
- Menor qualidade no acabamento e baixo rigor dimensional
- Elevado custo em máquinas de processos com pó como matéria prima
- Limitações em direitos de propriedade intelectual e garantia

Para além de um amplo número de vantagens, esta é também uma tecnologia que se aplica a vários materiais, onde se destacam os metais, polímeros e cerâmicos [5]. Por esse motivo, a mesma tem por base diferentes princípios de funcionamento associados ao tipo e forma do material utilizado no processo.

Considerando apenas as vertentes que utilizam metal ou polímero como material de adição, as mesmas podem ser organizadas de acordo com o diagrama apresentado na Figura 2.1.

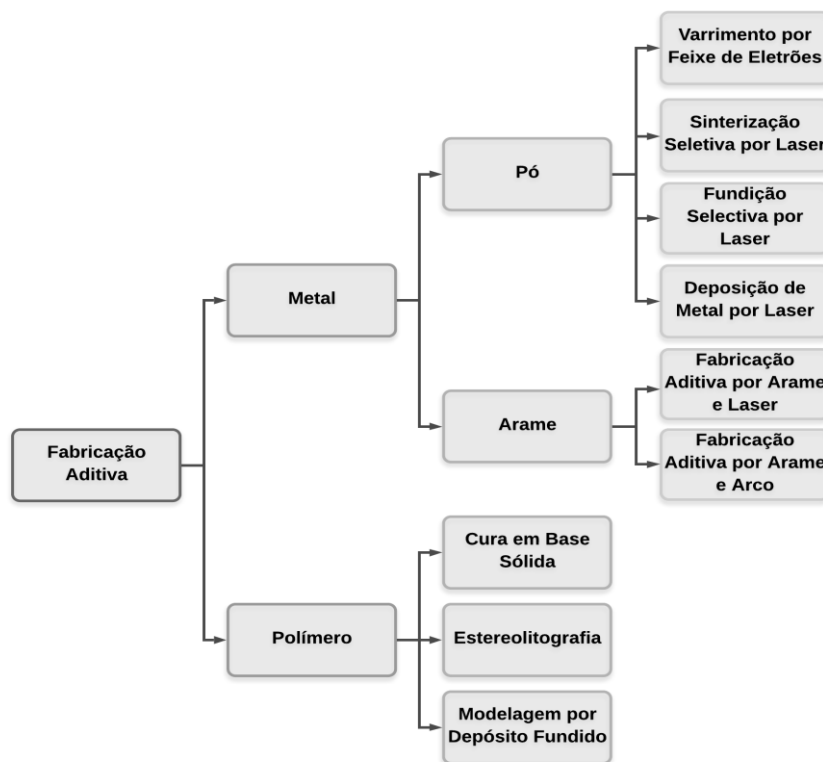


Figura 2.1: Ordem hierárquica das diferentes vertentes de Fabricação Aditiva.

2.2. Wire and Arc Additive Manufacturing

2.2.1. Contextualização Histórica

WAAM é um processo de fabricação aditiva de materiais metálicos que marca a sua posição como uma técnica de produção de componentes com propriedades mecânicas aceitáveis para serem utilizados nas mais diversas aplicações a partir de 1990. No entanto o mesmo já tem vindo a ser desenvolvido desde os anos 20s [6], uma vez que grande parte da tecnologia necessária para o seu progresso já se encontrava disponível no início do século XX.

Foi no ano de 1925 que foi registada a primeira patente deste processo, por Ralph Baker, invenção essa na qual o autor descobriu a aplicabilidade do processo de soldadura para obter objetos com uma finalidade estética, através da deposição incremental do material de adição [7]. Apesar do seu princípio estar descoberto, só após o avanço tecnológico no âmbito da robótica e do controlo de sistemas mecânicas, através de *softwares*, é que se tornou possível o processo chegar ao seu estado atual.

2.2.2. Processo

O conceito base deste processo consiste na combinação da tecnologia já existente na soldadura com o princípio de funcionamento da Fabricação Aditiva, ou seja, utiliza-se o equipamento típico da soldura (fonte de energia, tocha, arame, sistema de alimentação e gás de proteção) combinado com um sistema robotizado comandado por um *software* por forma a controlar o movimento da tocha [8] (Figura 2.2).

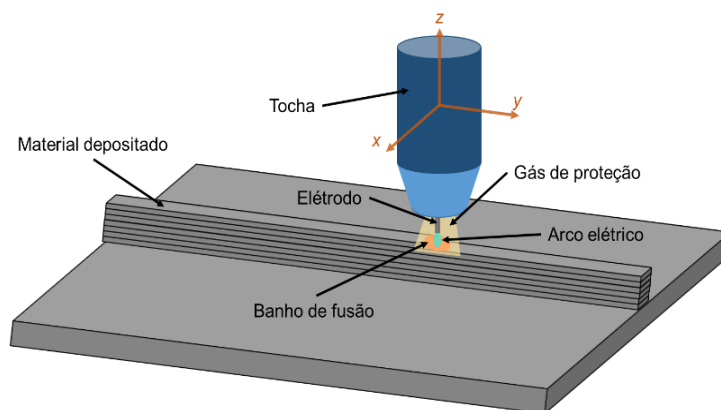


Figura 2.2: Representação esquemática do processo WAAM.

Na maioria dos casos são utilizados processos de soldadura por arco elétrico, ou em inglês, GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), mais vulgarmente conhecidos pelos processos MIG (*Metal Inerte Gas*) e MAG (*Metal Active Gas*).

2.2.3. Vantagens

Dadas estas características, o WAAM consegue colmatar problemas encontrados em outras vertentes de AM, mais precisamente nas do tipo de Fusão em Cama de Pó, como é o caso dos baixos níveis de deposição de material. Também é um dos poucos processos em que os níveis de desperdício de material se aproximam bastante de zero, especialmente na produção de peças que não necessitem de processos de acabamento posteriores. Por outro lado, o facto de requerer apenas equipamento de soldadura e um sistema que o desloque ao longo dos três eixos, x y z , faz com que este processo implique um investimento inicial muito mais competitivo que os demais.

Estas características têm uma forte aplicação na indústria aeroespacial, onde existe a necessidade de produzir peças de grande dimensão com uma baixa relação *Buy-To-Fly*, relação essa que corresponde à comparação entre o volume ou massa de matéria-prima utilizado com a da peça final. Foram levados a cabo alguns estudos nos quais se comparou o impacto económico do processo WAAM com os processos convencionais de fabricação por remoção de material [9]. Nesse estudo foram contemplados todos os custos associados à produção da mesma peça pelos diferentes processos, onde o WAAM apresentou um menor custo de fabricação.

2.2.4. Desvantagens

Como qualquer outro processo, este não está isento de pontos fracos e por esse motivo é necessário ter em conta as limitações do mesmo. Como referido anteriormente, esta tecnologia tem por base as técnicas desenvolvidas na soldadura o que leva a que as peças que a mesma origina apresentem um controlo dimensional pouco rigoroso, bem como um acabamento superficial fraco. Esta característica faz com que muitas vezes sejam necessários processos de acabamento posteriores, o que aumenta o custo de produção do componente e ainda impossibilita a sua aplicação para a fabricação de peças de pequenas dimensões.

Por outro lado, apesar de ser um processo automatizado, muitas vezes é necessário definir criteriosamente o percurso que a fonte de calor vai tomar, uma vez que o aparecimento de deformações e consequentemente tensões residuais é um fenómeno constantemente presente no processo. É também necessário perceber que em determinadas localizações do componente existe uma possibilidade elevada de ocorrerem defeitos. Como avaliado por Venturini et al. (2016) [10], onde se observou uma redução indesejada na altura da peça, situada na intersecção de duas paredes (geometria em “T”). Estes detalhes poderão levar a reformulação de *design* desenvolvido inicialmente para o componente [8].

2.3. Ensaios Não Destrutivos

A inspeção efetuada em determinado material ou componente sem alterar as suas propriedades padrão (físicas, químicas, mecânicas e dimensionais) intitula-se de Ensaios não Destrutivos ou em inglês, *Non-destructive Testing* (NDT) [11].

Atualmente existe um grande número de componentes fabricados através dos mais diversos processos e os mais variados materiais, passando pelos metálicos até aos compósitos. Por esse mesmo motivo existe uma vasta gama de NDT, por forma a serem aplicáveis a todo o tipo de produtos existentes e ainda adequados ao tipo de defeito que se pretende inspecionar. A finalidade destes ensaios reside na intenção de avaliar determinadas propriedades de um dado componente, podendo assim tirar conclusões quanto à existência de defeitos provenientes de processos de fabrico.

Os NDT são uma tecnologia de elevada importância na indústria uma vez que é possível controlar o estado de componentes que tenham um grau de importância tal que se justifique esse controlo, como é o caso de componentes estruturais em que as suas propriedades devem corresponder às admitidas na fase de projeto. Esse controlo não é nada mais, nada menos do que a monitorização de uma dada propriedade, em que, caso haja uma variação indesejada e inesperada estaremos na presença de um defeito. Na grande maioria dos casos, esses defeitos apresentam dimensões e configurações que dificultam bastante a sua deteção, por isso é necessário ter um vasto conhecimento e um elevado rigor para aplicar tais técnicas por forma a evitar-se a deteção de defeitos inexistente ou até mesmo a não deteção de possíveis anomalias[12].

Pode-se, portanto, concluir que os NDT são uma ferramenta de grande relevância para a indústria uma vez que a sua correta aplicação permite evitar possíveis falhas em peças já a cumprirem o seu propósito, o que em certos casos poderá levar a consequências catastróficas. Do ponto de vista económico, estas técnicas também oferecem vantagens já que a deteção prévia de defeitos sem comprometer a integridade dos produtos possibilita a sua utilização caso seja verificada a ausência de má-formações, poupando assim o custo dos mesmos. Por outro lado, encontrar defeitos incorrigíveis numa fase inicial leva à imediata descontinuidade de um determinado componente na sua fabricação, onde seriam despendidos ainda mais recursos em processos de fabrico posteriores

2.5. Aplicação de NDT na Soldadura

2.5.1. Soldadura GMAW

A soldadura GMAW, é das vertentes de soldadura mais utilizadas na produção de peças por fabricação aditiva de metal pois para além de ser uma técnica bastante eficaz e eficiente, permite a sua utilização de forma robotizada e automatizada, uma vez que todos os componentes estão combinados numa só ferramenta denominada tocha.

Apesar desta vertente ser adequada para o efeito, o seu princípio de funcionamento é complexo, pois consiste na formação de um arco elétrico entre o eletrodo consumível sobre a forma de arame e a peça a soldar, enquanto que a proteção do banho de fusão contra a contaminação proveniente do meio envolvente é garantida por um gás inerte ou ativo[13].

Reconhecendo que o fenómeno base do processo é sensível, será também necessário controlar com algum rigor os seus parâmetros [14], sendo eles: o tipo e a intensidade da corrente elétrica, a tensão elétrica, o diâmetro e o comprimento do eletrodo consumível, a velocidade de alimentação do eletrodo, a espessura do material a soldar, a velocidade de soldadura, o ângulo da tocha e o gás de proteção [15], uma vez que a sua variação provocará diferentes formas de transferência do material de deposição: Curto-circuito, Globular, *Spray*, Rotativo e Pulsado [16].

O modo de transferência Curto-circuito é caracterizado pela formação de pequenas gotas na extremidade do eletrodo que vão aumentando até preencher todo o espaço entre a sua extremidade e o banho de fusão. Uma vez preenchido esse espaço, ocorrerá um curto-circuito que irá extinguir o arco elétrico que, por sua vez, é imediatamente originado quando a gotícula se separa do seu ponto de formação. Este fenómeno origina uma oscilação entre extremos da corrente e da tensão do arco elétrico à frequência de transferência do material. Este modo é muitas vezes utilizado para aplicações em que se pretendam soldar peças com espessuras reduzidas, uma vez que o mesmo é obtido quando a tensão e corrente do arco elétrico são de baixa intensidade. É também caracterizado por apresentar bons cordões de soldadura e produzir menos salpicos que o modo globular [17].

Para o caso do modo Globular, a transferência de material é feita através de uma gota de diâmetro superior ao do eletrodo que, ao atingir a dimensão crítica, separa-se do eletrodo e cai sobre o banho de fusão essencialmente por força da gravidade. Do ponto de vista elétrico, a corrente irá oscilar entre máximos e mínimos de acordo com a formação da gota e consequentemente com o encurtamento do arco elétrico. Dadas as características suprarreferidas, o mesmo originará um cordão menos preciso, produzindo mais salpicos em comparação com o modo de transferência Curto-circuito, para além de ser apenas aplicável a soldaduras planas e horizontais [17]. No entanto, caso o

comprimento do arco seja reduzido, o processo pode ser estabilizado reduzindo assim a formação de salpicos [18].

Combinando uma corrente acima da corrente de transição com Argon como gás de proteção é possível obter um modo de transferência em forma de *Spray* que, comparativamente ao anterior, produz cordões de melhor qualidade e obtém-se maiores níveis de produção. Tal acontece devido à elevada corrente imposta que produz forças eletromagnéticas que, por sua vez, levam à criação de gotículas de pequenas dimensões geradas a alta frequência [19].

Impondo uma corrente sob a forma de um impulso a uma frequência e duração calculadas com uma intensidade acima da corrente de transição, é possível obter-se o modo de transferência Pulsado que se caracteriza pela deposição sequencial de pequenas gotas de material fundido a uma cadência bem definida. Eletricamente, entende-se que são os picos de corrente que provocam a separação da gotícula do eletrodo, enquanto que a baixa corrente estabiliza o arco elétrico [20].

O modo de transferência rotativo pode ser compreendido como uma derivação do modo *Spray*, no entanto, é a utilização de um grande comprimento de eletrodo (20 mm a 40 mm) combinado com uma mistura de Ar e CO₂ que se o produz. Um eletrodo longo leva a uma maior resistência elétrica o que por sua vez leva a um aumento da temperatura ao ponto de fusão do mesmo. Como as forças eletromagnéticas geradas pela corrente elétrica forçam a extremidade do eletrodo a girar e a mistura gasosa afeta a tensão superficial da gota, o resultado é um modo de transferência rotativo [21].

A Figura 2.3 representa os diferentes modos de transferência localizando-os relativamente à tensão e corrente elétrica do arco.

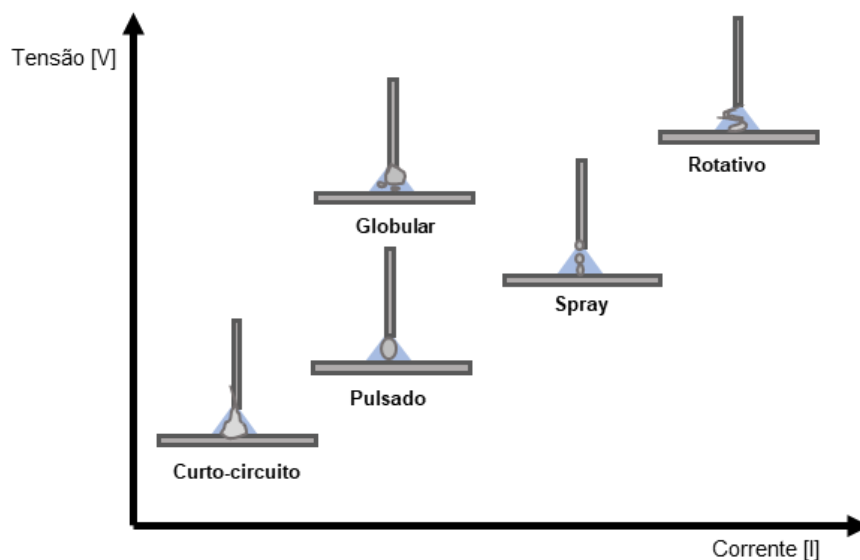


Figura 2.3: Posicionamento dos diferentes modos de transferência de material em função da corrente e tensão na soldadura GMAW (Adaptado de [22]).

A GMAW, apesar de ser um processo vantajoso, tem associados alguns efeitos negativos na saúde de quem opera estes processos, tais como: calor, luz e som excessivo.

Nesse sentido foram efetuados testes a estes aspetos, onde apenas irão ser aqui abordados os fenómenos de natureza sonora, que permitiram concluir que este tipo de soldadura conseguia produzir uma pressão sonora de até 100 dB no ouvido do operador. Por outro lado, e abordando o tema no sentido oposto, foi concluído que o som produzido pelo processo variava e que tais variações estariam diretamente relacionadas com a qualidade do mesmo, levando assim ao surgimento de um novo método de ensaios não destrutivos.

Foram levados a cabo vários estudos onde se conclui que as ondas sonoras geradas estão sincronizadas com o curto-circuito existente no processo e também que esse sinal sonoro é proporcional ao comprimento do arco elétrico e à corrente elétrica imposta, validando assim a aplicabilidade desta abordagem na observação dos parâmetros do processo [23,24].

2.5.2. Sinal Sonoro

A produção de som no processo de soldadura por arco elétrico é originada por três fontes: o arco elétrico, o gás de proteção e o equipamento de soldadura, no entanto, atendendo aos pressupostos admitidos nos estudos referidos anteriormente, considera-se que o som produzido pelo gás e pelo equipamento desprezíveis quando comparados com o gerado pelo arco elétrico

No sentido de avaliar esse sinal foram levadas a cabo várias investigações com o objetivo de estudar a correlação entre a variação de parâmetros como tensão, corrente, comprimento do arco elétrico e emissão sonora. Alguns autores argumentam que o arco elétrico produz um impulso sonoro cada vez que a seu nível de energia varia, ou seja, cada vez que ocorre uma variação na corrente elétrica, irá ser produzida uma onda sonora. Considerando que o volume de plasma é proporcional à energia do arco, que o mesmo depende dos parâmetros de soldadura e que os mesmos produzem diferentes modos de transferência, pode-se concluir que o sinal sonoro será dependente da energia fornecida, do modo de transferência e do rácio de transferência do material de deposição [25].

Para facilitar a compreensão pode-se considerar o caso admitido em [23], onde apenas foi estudado a produção sonora para o modo de transferência Curto-circuito.

Pela Figura 2.4 é possível concluir que entre o ponto 1 e 3, onde não existe formação de arco elétrico, é onde se dá o maior pico de corrente elétrica. Já do ponto 4 a 6, deixa de haver contacto entre o fio do consumível e o banho de fusão sendo onde se origina o arco elétrico, estando ainda associado a uma diminuição da corrente elétrica. É entre estes dois intervalos definidos pela formação e destruição do arco que se podem distinguir os dois fenómenos originadores de emissões sonoras. A primeira acontece devido ao curto-circuito que acaba com a ignição do arco elétrico no ponto 4 (ponto 1 até 4) e a segunda corresponde à oscilação do próprio arco acabando, portanto, no ponto 6 onde o próprio se destrói (ponto 4 até 6).

Posto isto, pode-se classificar o som emitido no processo em dois grupos:

- **Som sob a forma de impulso**

A primeira origem provém do curto-circuito entre o eléctrodo e material a soldar e, conseqüentemente, pela extinção do arco eléctrico que vem acompanhado de uma projecção parcial do material de adição fundido ao embater no banho de fusão (Ponto 1).

A segunda origem é resultado da ignição do arco eléctrico que por sua vez provoca um rápido aumento na temperatura e a conseqüente expansão do gás de proteção ao redor do arco eléctrico, provocando um pulso na atmosfera circundante (Ponto 4)

- **Ruído**

O ruído turbulento está associado a todos os processos ou mecanismos que produzam som ou tenham influência na sua propagação. São, no entanto, as oscilações do arco eléctrico, do eléctrodo e do banho de fusão, assim como oscilações associadas à contração e descontração térmica dos materiais, que têm o papel mais significativo na produção de sinal sonoro.

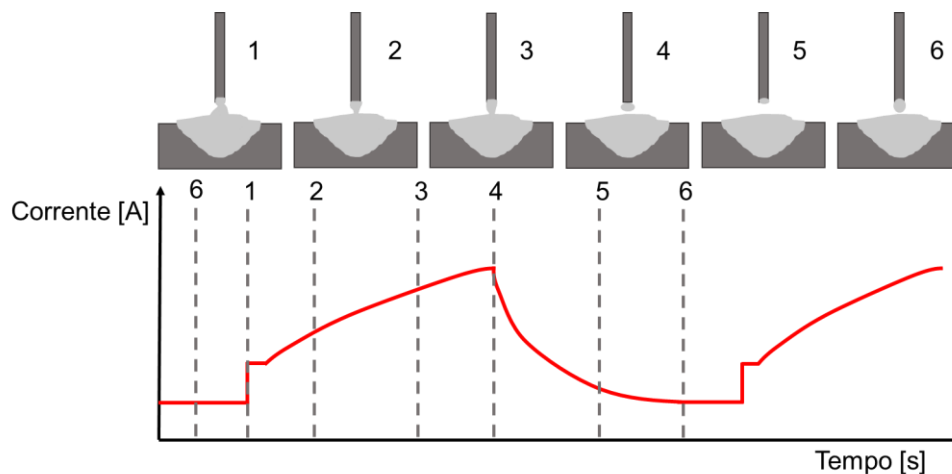


Figura 2.4: Representação da corrente eléctrica na soldadura ao longo das diferentes fases do processo de GMAW em modo de transferência Curto-circuito (Adaptado de [23]).

Fontes sonoras secundárias e vibrações parasitas são elementos constantemente presentes em ambientes industriais, por isso, o som capturado no processo de soldadura está sempre contaminado por ruídos de fundo. No sentido de perceber a influência deste inconveniente são feitas medições ao ruído de fundo com e sem o decorrer do processo de soldadura. Caso a diferença entre as mesmas seja superior a 10 dB o efeito do ruído de fundo é menosprezado. Por outro lado, caso a condição anterior não se verifique as medições do sinal sonoro relativo ao processo terão de ser descartadas ou terão de ser implementadas medidas que anulem esse efeito de contaminação do sinal sonoro em análise.

2.6. Captação do Sinal Sonoro

Logo após reconhecer a existência de um sinal sonoro proveniente do processo de fabrico WAAM vem a necessidade de captá-lo para posteriormente se tirarem conclusões relativamente ao mesmo, nesse sentido, a ferramenta indicada para o esse efeito será o microfone.

Um microfone é simplesmente um transdutor elétrico que converte a pressão sonora em forma de onda, originada por determinada fonte de oscilação, em um sinal elétrico. Uma vez que existem diferentes princípios físicos por detrás da produção desse sinal elétrico, os microfones podem ser divididos em várias classes, sendo elas: microfones piezoelétricos, microfones capacitivos e microfones dinâmicos [26].

2.6.1. Microfones Piezoelétricos

O princípio de funcionamento dos microfones piezoelétricos, como o próprio nome indica, tem por base o princípio do efeito piezoelétrico, que se baseia na formação de carga elétrica nas superfícies do material quando aplicada pressão sobre a mesma. Esse efeito pode ainda ser direto ou inverso, ou seja, é possível também gerar uma deformação sobre a face da placa piezoelétrica caso seja aplicada uma carga elétrica sobre a mesma, fazendo assim o efeito contrário ao explicado anteriormente. No caso dos microfones, o efeito desejado será o direto, uma vez que é a aplicação de pressão, neste caso pressão sonora, sobre a placa que produzirá um sinal elétrico. Uma vez que esse sinal varia de acordo com as oscilações da pressão sonora, o resultado é um sinal elétrico que traduz a onda sonora captada [27].

Percebido o seu funcionamento é possível concluir que este género de microfones é mais simples que outras variantes, uma vez que não necessita de uma fonte de alimentação como é o caso dos capacitivos. Por outro lado, são pouco sensíveis quando comparados com os de outro tipo, no entanto têm se desenvolvido técnicas para reduzir a tensão residual do diafragma do transdutor e assim aumentar a sua sensibilidade [28]. A Figura 2.5 corresponde a uma representação esquemática do funcionamento do microfone.

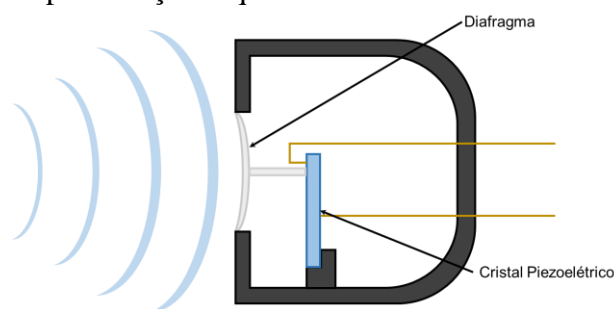


Figura 2.5: Esquema ilustrativo de um microfone piezoelétrico (Adaptado de [29]).

2.6.2. Microfones Capacitivos

Como se pode observar na Figura 2.6, os elementos necessários para dar origem a um microfone do tipo capacitivo são um diafragma, uma placa metálica fixa e um sistema de alimentação, podendo ser interno (bateria) ou externo.

É alimentando com uma tensão elétrica conhecida por *phantom power*, tipicamente de 48 V [30], o sistema composto pela placa metálica e pelo diafragma, separados por um pequeno espaço, que se criará um condensador.

Uma vez que a parte exposta ao exterior do condensador é móvel (diafragma) a sua lacuna estará sujeita a alterações de dimensão de acordo com as pressões impostas no diafragma, o que por sua vez alterará a capacitância do sistema [31]. Já que essa alteração da capacitância varia consoante as variações de pressão da atmosfera circundante é possível associar o sinal elétrico adquirido com as ondas sonoras.

De acordo com [32], a elevada sensibilidade a pequenas variações de pressão e a resistência ao pó e humidade quando hermeticamente selados, são as características que distinguem positivamente esta vertente de microfones. Por outro lado, o facto de necessitarem da aplicação de uma tensão elétrica e serem mais sensíveis faz com que não sejam indicados para aplicações em ambientes mais hostis.

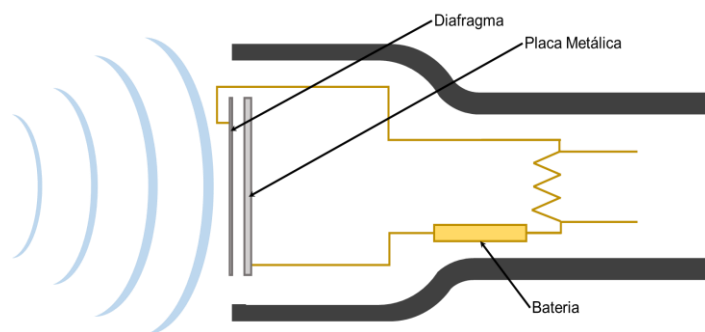


Figura 2.6: Esquema ilustrativo de um microfone capacitivo (Adaptado de [33]).

2.6.3. Microfones Dinâmicos

Um microfone dinâmico baseia-se na utilização de uma bobina, um diafragma e ímanes dispostos de forma ser possível captar o sinal sonoro e convertê-lo num sinal elétrico. A configuração dos diferentes componentes pode ser compreendida de melhor forma observando a Figura 2.7.

A onda sonora ao embater no diafragma irá produzir uma oscilação no mesmo que, consequentemente, irá movimentar a bobina sobre o campo magnético gerado pelos ímanes. Por sua vez esse movimento irá produzir uma corrente induzida, de

acordo com as leis de Lenz e Faraday [34]. Sabendo que essa corrente induzida varia consoante a oscilação imposta pela onda sonora, o resultado é um sinal elétrico variável e concordante com o som captado, que poderá ser posteriormente interpretado e/ou processado de acordo com a finalidade pretendida.

Uma vez que a bobina tem uma grande massa quando comparada com os restantes sistemas dos outros tipos de microfones, é necessário reconhecer que este é apenas indicado para medições de som com intensidades significativas devido à grande quantidade de pressão sonora necessária para mover a bobina. Esta característica faz com que apresente uma sensibilidade reduzida comparativamente aos restantes. No entanto, apresenta uma resistência e uma durabilidade elevadas para além de não necessitar de uma fonte de alimentação externa.

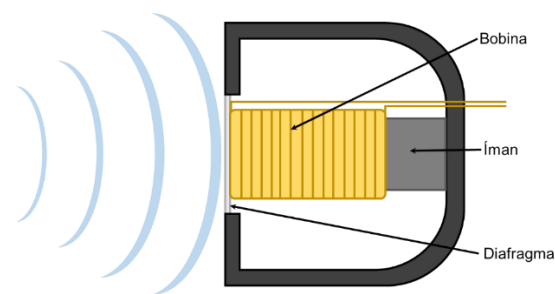


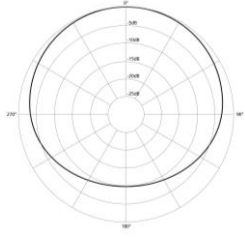
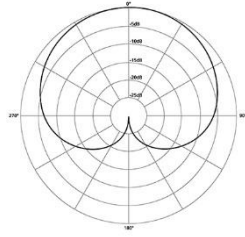
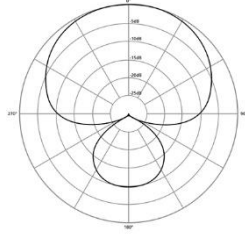
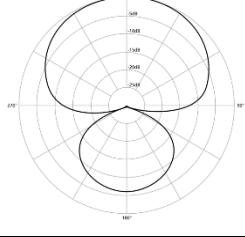
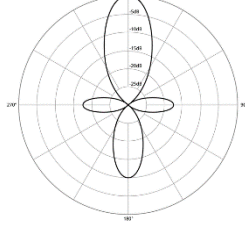
Figura 2.7: Esquema ilustrativo de um microfone dinâmico (Adaptado de [35]).

2.6.4. Padrões Polares dos Microfones

Os microfones podem ainda ser classificados de acordo com a seu padrão polar, ou seja, diferentes tipos de microfones captam mais ou menos eficazmente fontes sonoras de determinadas orientações. Os vários tipos podem ser classificados de acordo com o apresentado na Tabela 2.2

Tabela 2.2: Tipos de Microfones (Adaptado de [36]).

Tipos de microfones	Descrição	Diagrama polar
Omnidirecional	Captam o som de qualquer direção (360°).	
Bidirecional	Captam o igualmente o som orientado com o eixo da cápsula (0° e 180°), rejeitando o de 90° e 270°.	

Sub cardióide	Captam com maior eficácia sons emitidos à sua frente. À medida que a fonte sonora se desloca do eixo central para trás do microfone a sua captação reduz-se. Sons vindos de trás são captados com relativa baixa intensidade	
Cardióide	Captam com maior eficácia sons emitidos à sua frente. À medida que a fonte sonora se desloca do eixo central para trás do microfone a sua captação reduz-se. Sons vindos de trás (180°) não são captados.	
Hiper cardióide	Além do som emitido na sua frente, captam parte do som emitido na parte de trás. Isto produz um aumento de ganho sem provocar microfonia.	
Super cardióide	Além do som emitido na sua frente, captam parte do som emitido na parte de trás. Isto produz um aumento de ganho sem provocar microfonia.	
Shotgun	Microfones do tipo <i>shotgun</i> são os mais direcionais. Possuem quatro lóbulos de sensibilidade alinhados com os dois eixos, 0°, 90°, 180° e 270°. A sua sensibilidade é mais acentuada à frente.	

2.7. Processamento de Sinal

Para analisar determinado sinal sonoro, a primeira abordagem será interpretá-lo no domínio do tempo. Analisar o sinal nesse domínio passa por associar determinado valor de pressão sonora ao instante em que o mesmo ocorre. O raciocínio é semelhante à representação gráfica de uma função matemática onde se representam os vários valores de y em função da variável independente x , sendo que neste caso a variável independente será o tempo (t) e os valores que dela dependem correspondem a pressão ($p(t)$).

Para uma onda periódica, originada pela oscilação harmónica de determinada fonte, a expressão que traduz o fenómeno será sempre do tipo $\text{seno}(x)$ ou $\text{cosseno}(x)$, no entanto uma onda harmónica poderá ter diferentes propriedades como, comprimento de onda, frequência e amplitude. Este princípio pode ser comparado ao movimento de oscilação de uma mola onde é feita a representação do deslocamento relativo a determinado ponto de equilíbrio ao longo do tempo.

Reunindo esta informação, a equação que traduz o comportamento de uma onda harmónica, como apresentado na Equação 2.1, é dada por:

$$y = A \text{sen}\left(2\pi ft - \frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (2.1)$$

Onde A é a amplitude, f a frequência, λ o comprimento de onda e t o tempo [37].

Apesar da equação que traduz o movimento de uma onda harmónica ser de fácil compreensão, em aplicações reais é muito difícil encontrar uma onda deste tipo. O que acontece é a produção de ondas bem mais complexas originadas pela sobreposição de várias ondas harmónicas com diferentes amplitudes, comprimentos de onda e frequências. Como se pode observar pela Figura 2.8, a soma das três sinusóides resulta num sinal bem mais complexo sobre o qual se torna bastante complicado retirar conclusões no domínio do tempo.

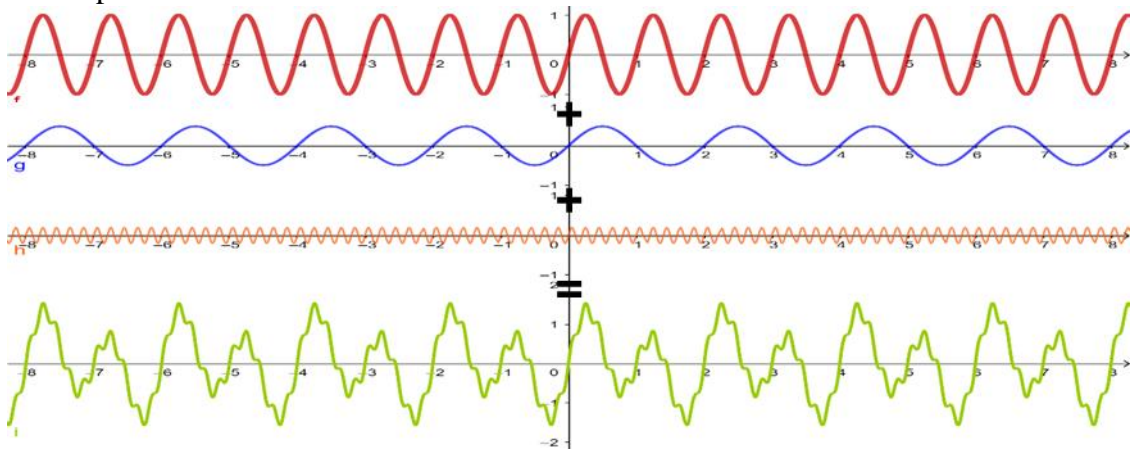


Figura 2.8: Três diferentes ondas harmónicas (ondas a cor vermelha, azul e laranja) e a onda resultante da soma das mesmas (onda a cor verde).

2.7.1. Transformada Rápida de Fourier

Como referido anteriormente um microfone capta a pressão sonora e converte-a num sinal elétrico que posteriormente é associado ao instante em que o mesmo ocorreu. Assim, para o caso de um sinal complexo, resultado da sobreposição de vários sinais harmónicos, o microfone apenas irá permitir visualizar o resultado final da soma das diferentes ondas.

Para um exame rigoroso, é muitas vezes necessário decompor o sinal, permitindo perceber quais as frequências associadas ao sinal captado. Uma das ferramentas que

permite transformar o sinal obtido no domínio do tempo para o domínio da frequência denomina-se Transformada Rápida de Fourier, ou em inglês *Fast Fourier Transform* (FFT).

Esta ferramenta consiste numa aplicação computacional simplificada da Transformada Discreta de Fourier, ou em inglês *Discrete Fourier Transform* (DFT), que tem por base a equação correspondente à transformada de Fourier (Eq. 2.2).

$$\hat{f}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.2)$$

Onde $f(t)$ é a função que representa o sinal em análise, t a variável independente, ω a frequência angular e $\hat{f}(t)$ é a transformada de Fourier da função $f(t)$ [38].

Para uma melhor compreensão pode-se raciocinar de uma perspetiva geométrica. Considere-se que a multiplicação da função $f(t)$ pelo termo $e^{i\omega t}$ corresponde a percorrer, ao longo do círculo trigonométrico, uma parcela do sinal no domínio do tempo, a uma frequência ω . Como representado na Figura 2.9, o resultado desse percurso será uma forma geométrica dependente da frequência com a qual se percorre o sinal. Neste caso, apresenta-se uma frequência de seis picos por revolução.

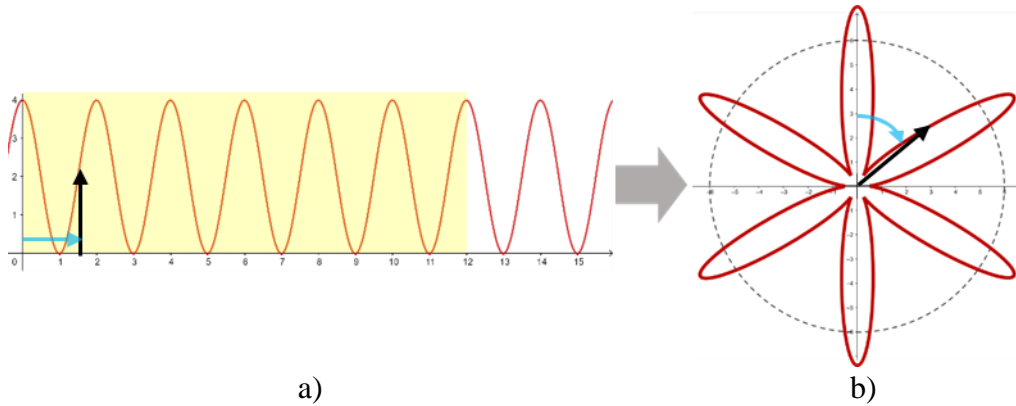


Figura 2.9: a) Onda harmónica ao longo do referencial xy . b) Representação de uma onda harmónica ao longo do círculo trigonométrico.

Posteriormente, pode-se considerar tal figura como um corpo com uma massa definida, sobre o qual se irá controlar a posição do centro de massa no círculo trigonométrico à medida que o mesmo varia de forma, consoante a frequência que se aplica. Matematicamente este raciocínio corresponderá a fazer uma média dos pontos retirados ao longo do percurso definido pela multiplicação da expressão anterior. Traduzindo o anteriormente dito para linguagem matemática, o resultado será uma expressão equivalente à DFT (Eq. 2.3).

$$\frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} f(t_n) e^{-i\omega t_n} \quad (2.3)$$

Curiosamente o resultado não será muito diferente para as várias gamas de frequência, exceto quando a mesma coincide com a frequência de oscilação do sinal em análise (um pico por revolução). Observando a Figura 2.10 percebe-se que o centro de massa do corpo originado por essa frequência desvia-se significativamente do centro geométrico do círculo.

Caso represente-se graficamente a posição do centro de massa ao longo dos vários valores de frequência (Figura 2.10), isto é, y corresponde aos valores do comprimento do vetor entre o centro do círculo e o centro de massa do corpo e x corresponde à gama de frequências, o resultado será o espectro de frequências do sinal analisado, ou seja, o *output* da FFT.

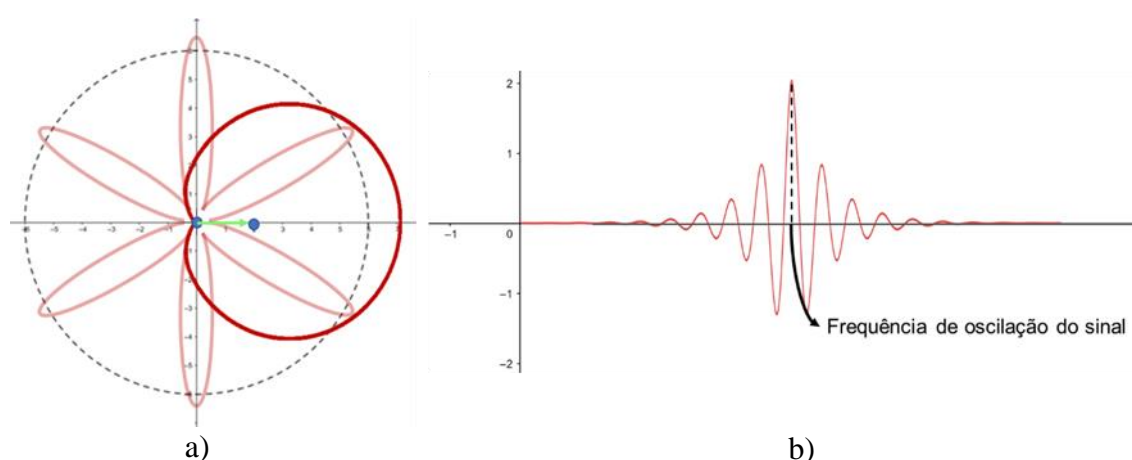


Figura 2.10: a) Representação de uma onda harmônica no círculo trigonométrico. b) Representação no referencial xy do comprimento do vetor entre o centro do círculo trigonométrico e o centro geométrico das diferentes formas originadas pela representação de uma onda harmônica no círculo trigonométrico para as várias frequências angulares.

2.7.2. Transformada de Fourier de Curto Termo

Uma das lacunas encontradas na aplicação da ferramenta FFT reside no facto de nem sempre o sinal em análise ser constante ao longo do tempo. Na grande maioria das vezes o que acontece é a leitura de sinais que variam a sua morfologia ao longo do instante em que se efetua a sua captação. No caso da avaliação do sinal sonoro para a deteção de defeitos, o interesse está em perceber as variações que ocorrem na produção desse mesmo sinal. Se aplicarmos a FFT em todo o intervalo temporal, o resultado será o espectro de frequências que o originou. Uma vez que esta ferramenta contempla unicamente o domínio da frequência, será impossível associá-las ao instante em que ocorreram. Admitindo a hipótese que aqui se considera, nunca será perceptível analisar determinada variação do sinal caso se aplique cegamente a ferramenta anterior.

Para colmatar esta problemática, nasce a Transformada de Fourier de Curto Termo, ou em inglês *Short-Time Fourier Transform* (STFT). Esta ferramenta consiste num conjunto de aplicações sistemáticas da FFT em pequenos intervalos de tempo definidos ao longo de todo o domínio temporal do sinal [39]. Como esquematizado na Figura 2.11, define-se um intervalo de tempo, aplica-se a FFT e em seguida faz-se representar o obtido num gráfico frequência-tempo-amplitude, por forma a associar as frequências e respetivas amplitudes ao intervalo em que ocorrem. Uma vez que o resultado é um gráfico de três dimensões, para facilitar a sua interpretação, pode-se planificá-lo e traduzir a dimensão *amplitude* para um esquema de cores que permita a distinção entre os diferentes valores. Repetindo este processo ao longo de todo o domínio temporal, o resultado será o *output* final da ferramenta STFT.

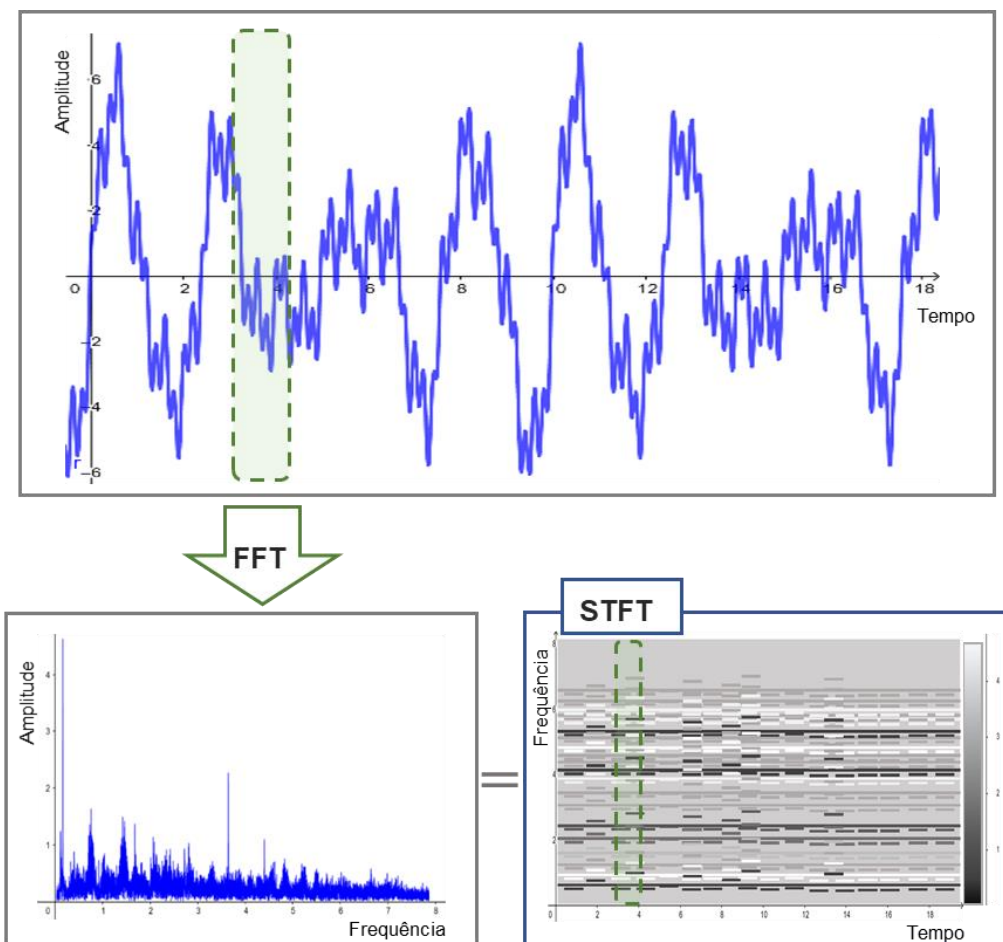


Figura 2.11: Representação esquemática do princípio de funcionamento da STFT.

Revista a bibliografia existente nesta temática, estudados os princípios físicos associados ao processo e apresentadas as ferramentas que permitem analisar um sinal sonoro no domínio tempo, da frequência e/ou considerando simultaneamente ambos os domínios, estão reunidas as condições necessárias para a elaboração da componente experimental.

Capítulo 3. Procedimento Experimental

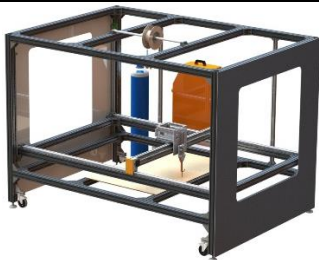





3.1. Equipamento

3.1.1. Seleção de Componentes

Para levar a cabo a montagem experimental foram selecionados todos os equipamentos indicados para as diferentes funções. Esse material é apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Lista de equipamento e respectivas características.

Equipamento	Características	Ilustração
Microfone	<ul style="list-style-type: none">• Modelo: Shure SM57• Tipo: Dinâmico• Padrão polar: Cardióide• Sensibilidade: -56 dBV/Pa• Impedância de saída: 310 Ω	
Placa de aquisição	<ul style="list-style-type: none">• Modelo: National Instruments 6000• N° de entradas analógicas: 8• Resolução de entrada: 12 bits• Taxa de amostragem máxima: 10 kS/s	
Placa de aquisição	<ul style="list-style-type: none">• Modelo: National Instruments 9234• N° e tipo de entradas: 4 BNC• Taxa de amostragem máxima: 51,2 kS/s/canal• Alcance do sinal: ± 5 V	
Placa de aquisição	<ul style="list-style-type: none">• Modelo: National Instruments 6008• N° de entradas analógicas: 8• Resolução de entrada: 12 bits• Taxa de amostragem máxima: 10 kS/s	

Equipamento WAAM	<ul style="list-style-type: none"> • Envelope de trabalho: 2760 × 1960 × 2000 mm • Graus de liberdade: 3 	
Fonte de energia	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo: Kemppi Pro MIG 3200 • Gama de tensões: 360 V a 440 V • Tensão nominal: 400 V • Fusível <i>slow-blow</i>: 25 A • Cabo de conexão (mm²): 4x6 	
Fio consumível	<ul style="list-style-type: none"> • Referência: AWS A5.28 ER110S-G • Diâmetro: 1 mm • Composição química (%): C - 0,10; Si - 0,70; Mn - 1,70; Ni - 2,00; Mo - 0,50; Cr - 0,30. 	
Substrato	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensões: 200 × 80 × 8 mm • Material: Aço carbono 	
Gás de proteção	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo: Alphagaz 1 Argon • Composição química (%): Ar - 99,9999 	
Computador	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo: MSI PS63 Modern 8RC • Processador: Intel Core i7-8565U • Memória RAM: 16 GB DDR4 • Disco rígido: 512 GB SSD 	

3.1.2. Desenvolvimento de Componentes

Um dos requisitos implícitos neste procedimento experimental é a conexão rígida do microfone à tocha por forma a manter uma distância constante de aproximadamente 250 mm da extremidade do microfone ao arco elétrico. Para além de limitações funcionais, a escolha desta distância deveu-se, principalmente, à tentativa de aproximação da distância entre a fonte sonora e o ouvido de um operador. Segundo Horvat et al. (2010)

[23] esta distância corresponde aproximadamente a 350 mm, por outro lado em Cayo et al. (2009) [24] utilizou-se uma distância de 150 mm.

Uma vez que não existem componentes pré-concebidos para a função, foram projetados dois componentes:

- **Braço rígido**

Para ligar o microfone à tocha e assim manter a distância pretendia, construiu-se um braço a noventa graus através de dois perfis *Bosch* 40 × 40 mm e respetivas uniões. A Figura 3.1 expõe a sua configuração, bem como as suas dimensões gerais.



Figura 3.1: Braço rígido (dimensões gerais).

- **Ligação móvel**

Para possibilitar o posicionamento do microfone em diferentes direções e ainda conectá-lo ao braço rígido, foi projetada uma ligação móvel, constituída por dois componentes, que permitem o mesmo rodar sobre o eixo z e x e ainda deslocar-se linearmente sobre o perfil vertical (eixo z).

As duas peças foram modelas através do *software SolidWorks* e posteriormente impressas na impressora 3D em PLA.

Para uni-las e ainda permitir a rotação entre as mesmas utilizou-se um parafuso *Allen* cabeça cilíndrica M4 com porca de rebite. Na Figura 3.2 encontra-se apresentada a ligação móvel na sua posição de funcionamento, bem como os seus eixos, e ainda uma vista explodida de todos os componentes integrantes da mesma.

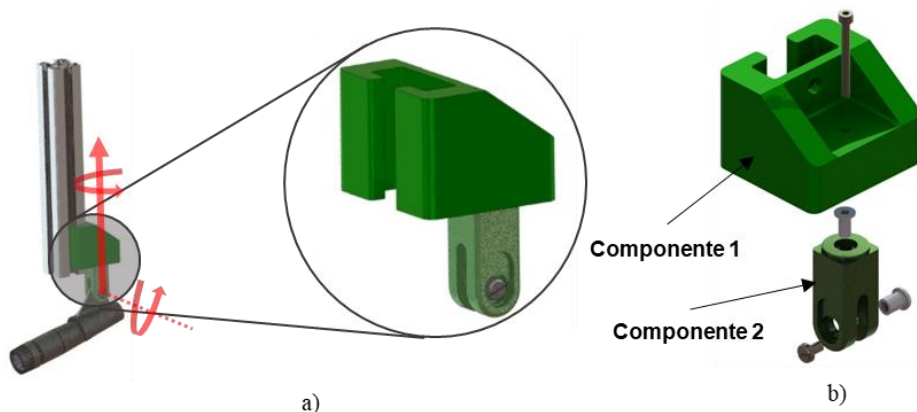


Figura 3.2: a) Posicionamento da ligação móvel, eixos respetivos e vista de aproximação. b) Vista explodida e identificação dos dois componentes principais.

3.1.3. Montagem Experimental

Uma vez que a máquina WAAM e os respetivos acessórios já se encontram montados, efetuou-se apenas a montagem do microfone à tocha e as ligações dos dispositivos para a aquisição da tensão, corrente elétrica e som do processo. Na Figura 3.3 é apresentada uma perspetiva geral do posicionamento do microfone.

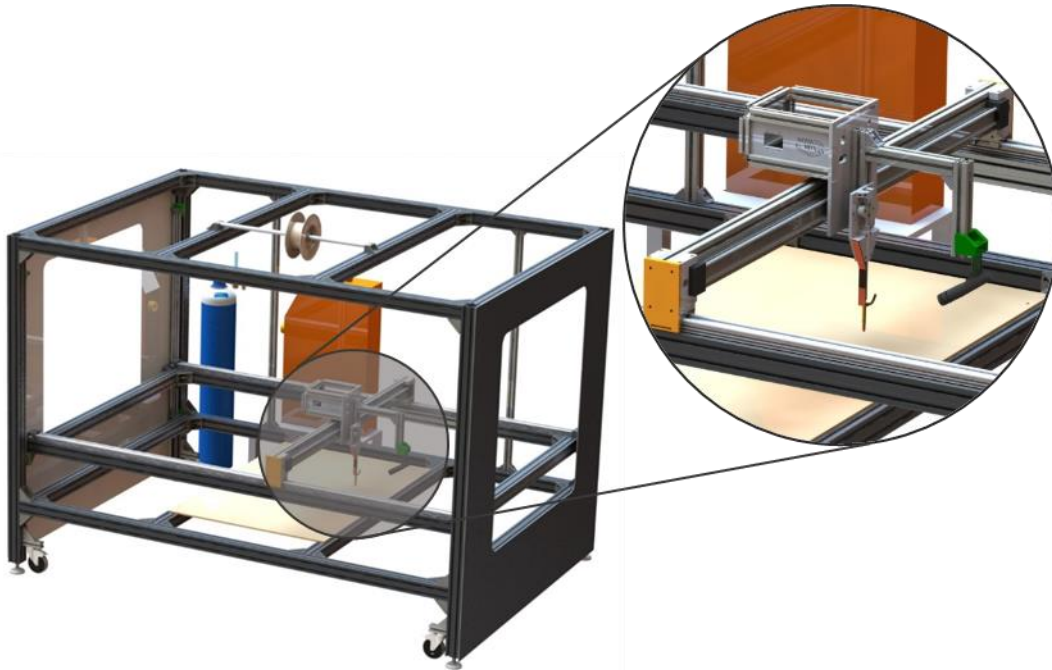


Figura 3.3: Perspetiva geral do posicionamento do microfone e vista de aproximação.

Sendo também necessário obter dados relativos às propriedades elétricas do processo efetuaram-se duas montagens, uma para a aquisição da corrente e outra para a aquisição de tensão elétrica.

Para a tensão elétrica utilizou-se a montagem já desenvolvida por Duarte (2016) [15], que consiste num redutor de tensão com um rácio de atenuação de 31 (Figura 3.4), conectado a uma placa de aquisição *National Instruments* USB 6008, com uma taxa de aquisição de 10 kS/s. O desenvolvimento do redutor deveu-se à limitação da gama de valores admissíveis para tensão por parte da placa de aquisição (entre -10 e 10 V).

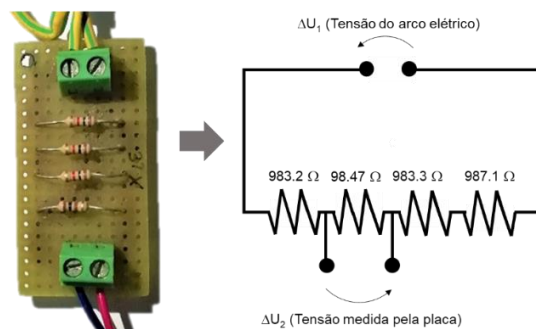


Figura 3.4: Circuito do redutor de tensão (Adaptado de [15]).

Relativamente à aquisição da corrente elétrica utilizou-se uma sonda *RS HTA 1000-S* aplicada diretamente no cabo terra, posteriormente conectada a uma placa *National Instruments* USB 6000 com uma taxa de aquisição de 1 kS/s.

Por último, para o sinal sonoro, conectou-se diretamente o microfone a uma placa *National Instruments* USB 9234, com uma taxa de aquisição de 25,6 kS/s. As três placas foram ligadas ao computador via USB para se proceder à leitura e recolha da informação através de um programa desenvolvido no *software Labview*.

Na Figura 3.5 é apresentada, esquematicamente, a montagem experimental de todos os componentes.

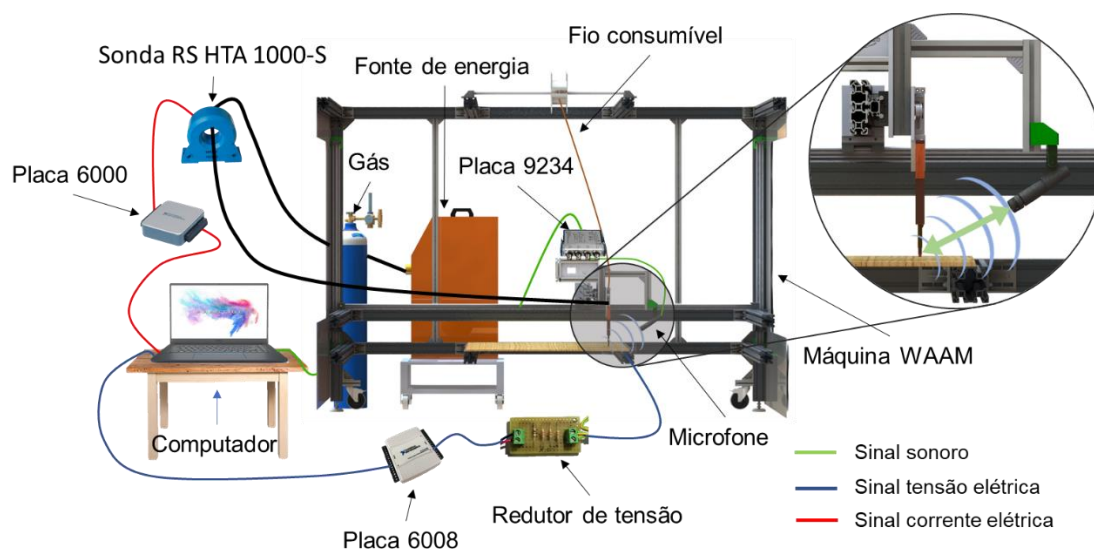


Figura 3.5: Esquema da montagem experimental.

3.2. Metodologia

Após desenvolvido o *setup* experimental procederam-se os ensaios preliminares com o intuito de perceber quais as fontes sonoras parasitas envolvidas no processo e qual a sua influência no espectro do som dos ensaios posteriores.

Reconhecendo todos os mecanismos intervenientes, fizeram-se os seguintes ensaios:

- Captação do sinal sonoro do motor correspondente ao movimento no eixo y
- Captação do sinal sonoro do motor correspondente ao movimento no eixo z
- Captação do sinal sonoro do exaustor
- Captação do sinal sonoro da extrusora ao dispensar o fio consumível
- Captação do sinal sonoro do gás de proteção a ser libertado

Desprezou-se o som do motor correspondente ao movimento no eixo x devido à inexistência de movimento nesse sentido para os ensaios pretendidos.

Posteriormente desenvolveu-se um conjunto de ensaios com o objetivo de simular falhas no processo em diferentes posições. A metodologia foi adotada apenas para o caso

da deposição de um cordão e para o caso da deposição de dez cordões. Onde, para este segundo caso, impuseram-se defeitos na quinta e décima camadas.

Para simular diferentes tipos de defeitos forçou-se o funcionamento do processo com a ausência de gás de proteção e com a deposição de pó de giz na superfície do substrato.

A grelha de ensaios e sua codificação é apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Tabela de ensaios experimentais.

Características	Baixa entrega térmica		Alta entrega térmica	
	1 cordão	10 cordões	1 cordão	10 cordões
Referência	Ensaio LH 1	Ensaio LH 7.1 ao LH 7.10	Ensaio HH 1	Ensaio HH 7.1 ao HH 7.10
Sem gás	Ensaio LH 2	Ensaio LH 8.1 ao LH 8.10	Ensaio HH 2	Ensaio HH 8.1 ao HH 8.10
Sem gás a partir de metade da deposição	Ensaio LH 3	Ensaio LH 9.1 ao LH 9.10	Ensaio HH 3	Ensaio HH 9.1 ao HH 9.10
Com giz na superfície a partir de metade	Ensaio LH 4	Ensaio LH 10.1 ao LH 10.10	Ensaio HH 4	Ensaio HH 10.1 ao HH 10.10
Com giz na superfície em zona pontual	Ensaio LH 5	Ensaio LH 11.1 ao LH 11.10	Ensaio HH 5	Ensaio HH 11.1 ao HH 11.10
Com giz na superfície em duas zonas pontuais	Ensaio LH 6	Ensaio LH 12.1 ao LH 12.10	Ensaio HH 6	Ensaio HH 12.1 ao HH 12.10

Os parâmetros utilizados nos ensaios experimentais apresentam-se na Tabela 3.3. Apenas se fez variar a velocidade de avanço para o caso da alta e da baixa entrega térmica.

Tabela 3.3: Parâmetros dos ensaios experimentais.

	Alta entrega térmica	Baixa entrega térmica
Velocidade de avanço [mm/s]	9	3,9
Velocidade de alimentação do fio consumível [m/min]	3	
Comprimento do cordão [mm]	150	
Caudal de Gás de proteção [l/min]	12	
Tensão [V]	19	
Corrente [A]	95	

Com vista a melhorar, exclusivamente, a percepção da relação entre as diferenças ocorridas no som e a utilização de diferentes parâmetros, repetiu-se o ensaio de referência

com uma entrega térmica num nível intermédio. Para esse efeito fixaram-se todos os parâmetros do processo, à exceção do valor de velocidade de avanço que passa agora a ter o valor correspondente à média entre os valores de baixa e alta entrega térmica, ou seja, 6,45 mm/s. Este último ensaio pode-se intitular como um ensaio com entrega térmica intermédia. Seguindo a nomenclatura dos ensaios anteriores e sabendo que apenas se produziu uma parede otimizada com 10 camadas, a deposição do cordão 1, 2, 3, ..., 10 intitulou-se ensaio MH1.1, MH1.2, MH1.3, ..., MH1.10, respetivamente.

Desenvolvido o procedimento experimental, apresenta-se de seguida a análise e discussão dos resultados obtidos neste capítulo.

Capítulo 4. Exposição e Discussão de Resultados

4.1. Ensaios Preliminares

Os resultados obtidos dos ensaios preliminares, definidos na secção 3.2 foram processados e representados graficamente através do *software Matlab*. Para permitir a comparação entre os espectros associados aos diferentes ensaios preliminares, é apresentado um sinal correspondente à deposição de um cordão de referência.

Os respetivos gráficos apresentam-se na Figura 4.1,

Figura 4.2, Figura 4.3, Figura 4.4, Figura 4.5, Figura 4.6 e Figura 4.7.

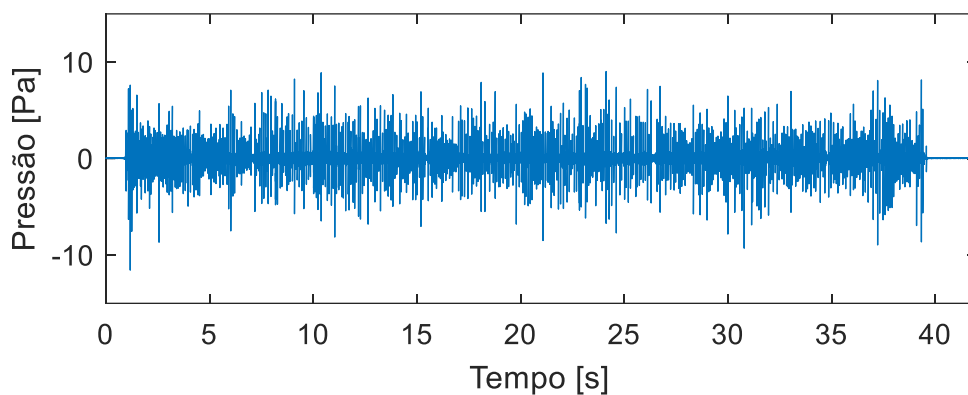


Figura 4.1: Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo à deposição de um cordão de referência.

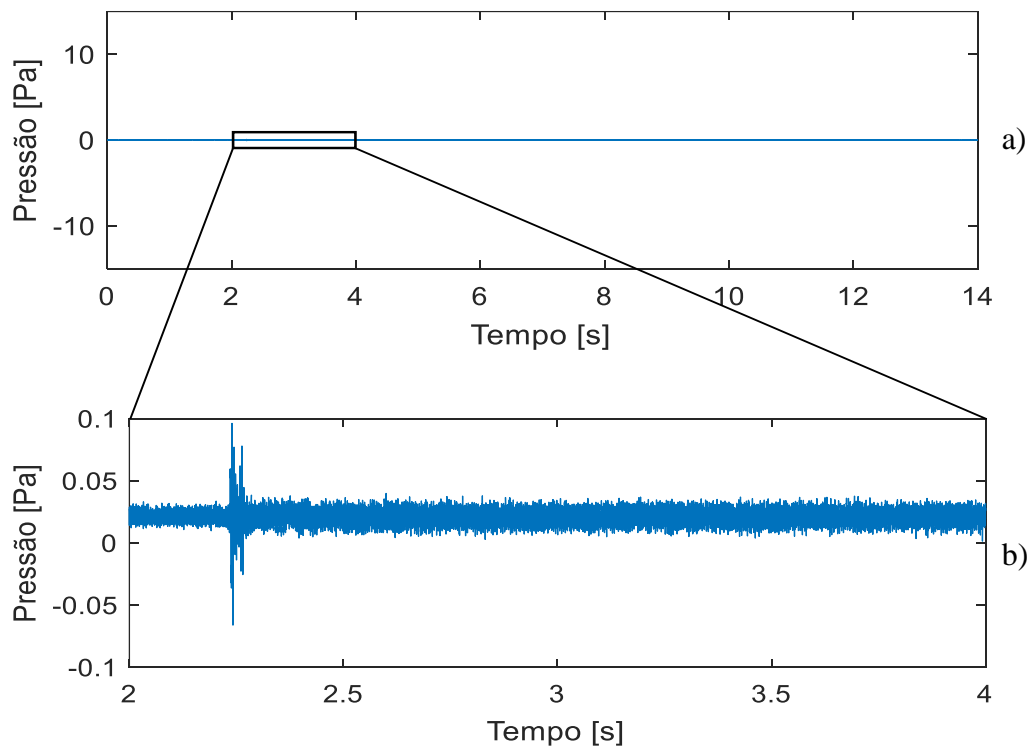


Figura 4.2: a) Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo ao movimento no eixo Y. b) Vista de aproximação do intervalo de tempo [2; 4] s.

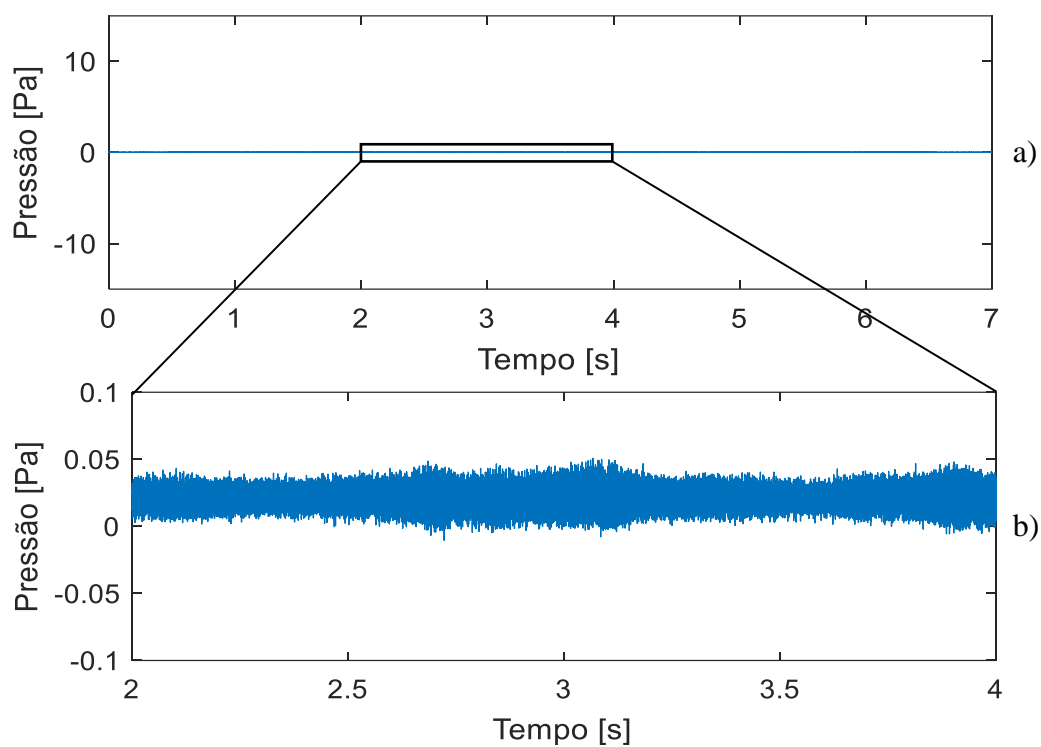


Figura 4.3: a) Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo ao movimento no eixo Z. b) Vista de aproximação do intervalo de tempo [2; 4] s.

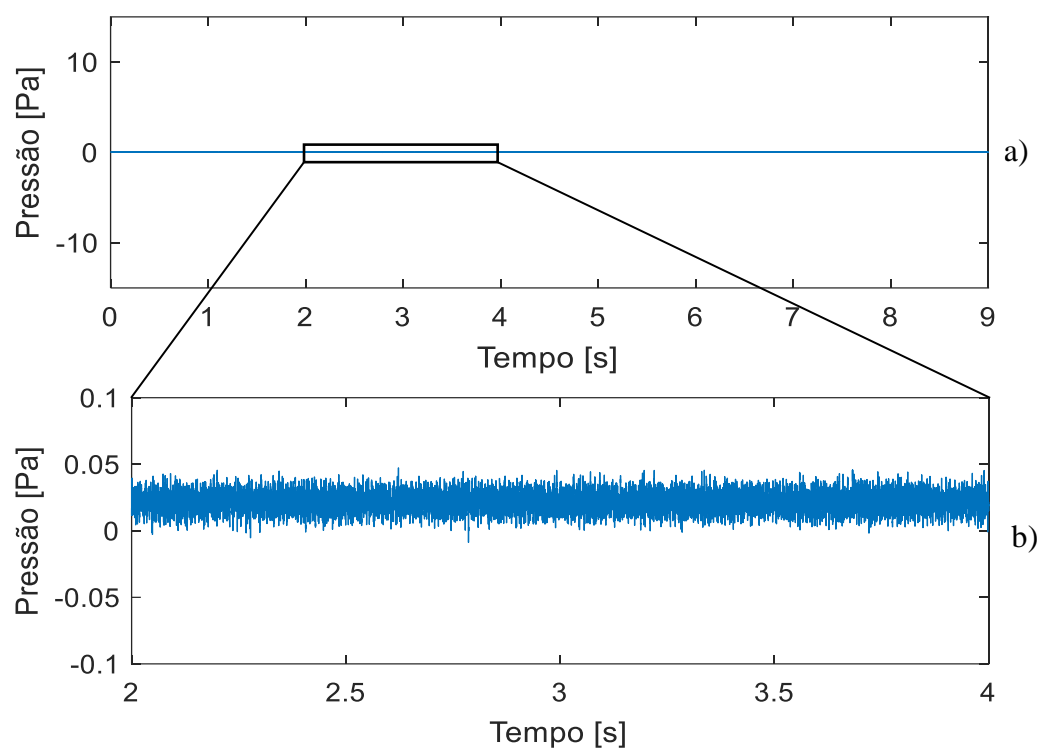


Figura 4.4: a) Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo ao funcionamento do exaustor. b) Vista de aproximação do intervalo de tempo [2; 4] s.

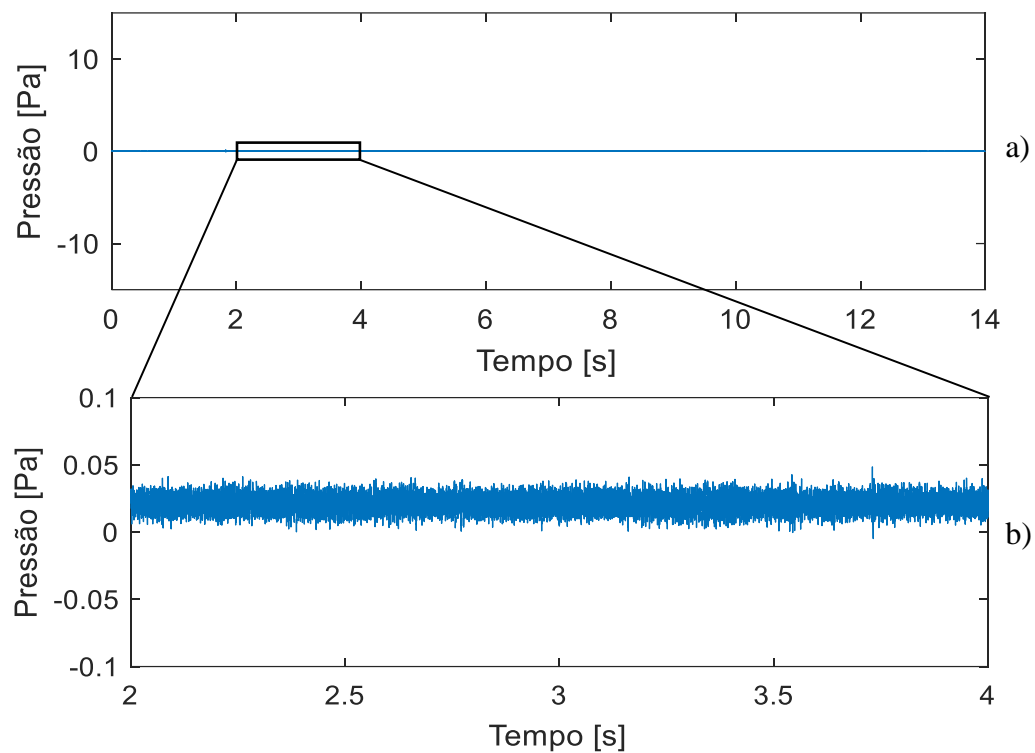


Figura 4.5: a) Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo ao movimento da extrusora. b) Vista de aproximação do intervalo de tempo [2; 4] s.

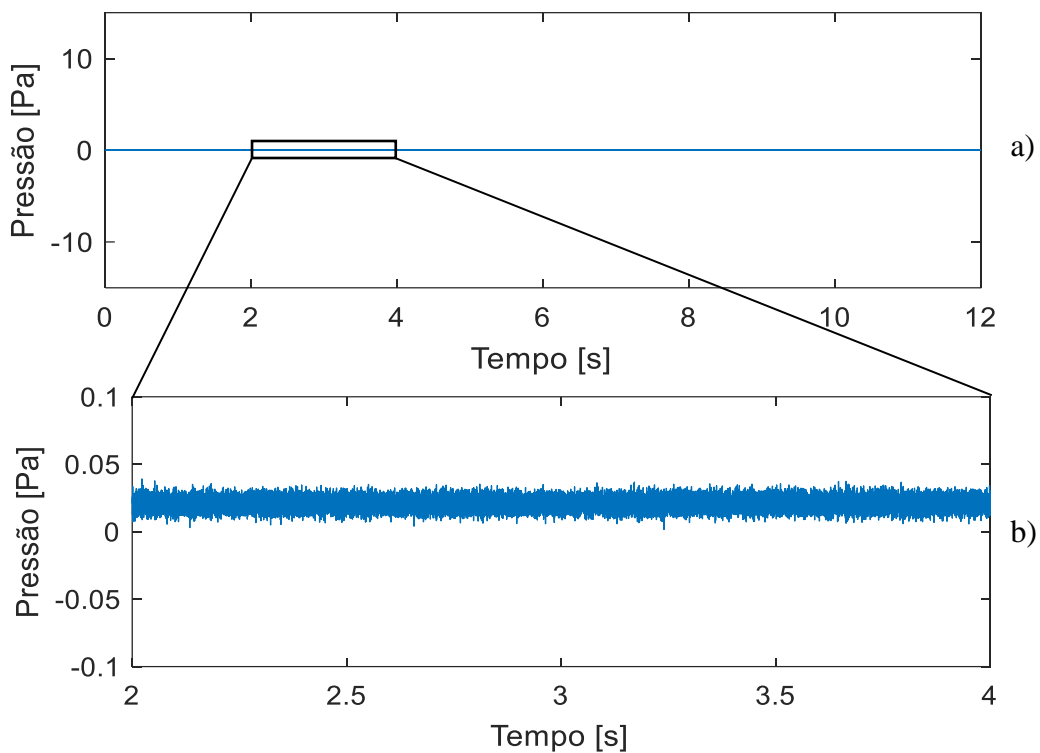


Figura 4.6: a) Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo ao gás de proteção a ser libertado. b) Vista de aproximação do intervalo de tempo [2; 4] s.

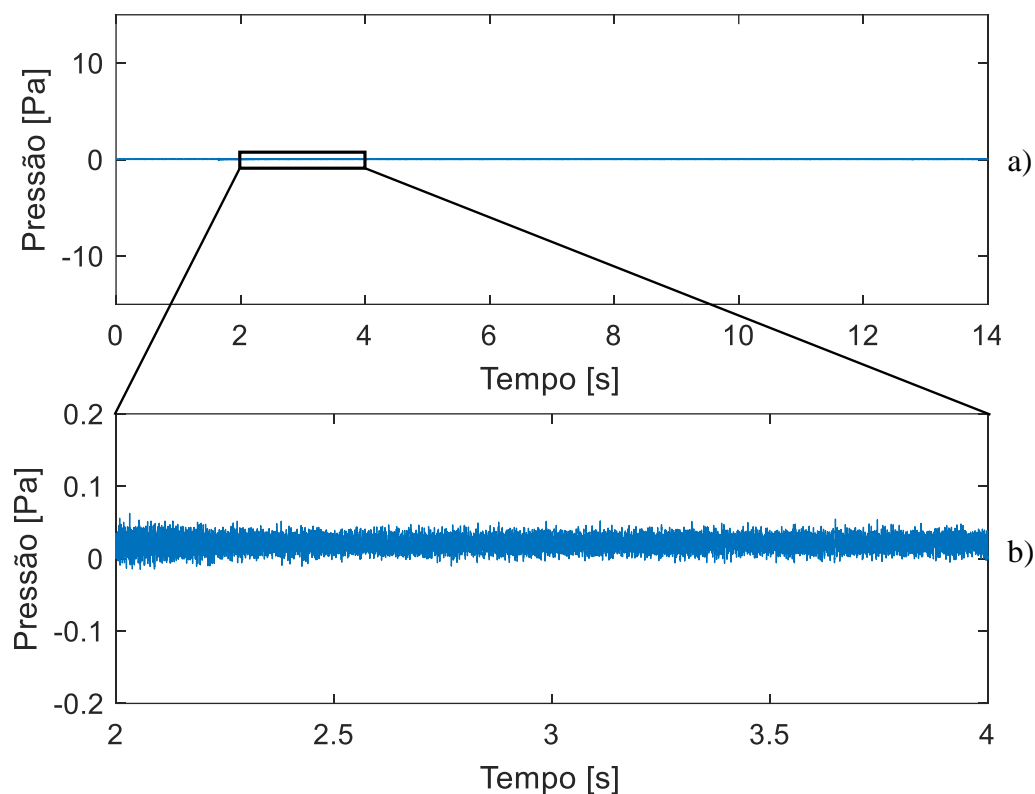


Figura 4.7: a) Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo a todos os sistemas em funcionamento sem criação de arco elétrico. b) Vista de aproximação do intervalo de tempo [2; 4] s.

Observando o sinal associado à deposição do cordão de referência e comparando-o com os sinais relativos aos ensaios preliminares, conclui-se que existe uma diferença bastante acentuada (uma a duas ordens de grandeza) entre os valores de pressão sonora obtidas nos mesmos. Assim depreende-se que a influência do som emitido pelos sistemas intervenientes não é relevante para análise (som parasita). Contudo, subsiste a necessidade de perceber quais as frequências presentes no espectro sonoro deste conjunto de ensaios, a fim de as identificar em espectros de ensaios posteriores. Para levar a cabo esta análise a ferramenta indicada será a STFT.

Nas Figuras 4.8 até 4.13 encontram-se os gráficos resultantes da aplicação desta ferramenta.

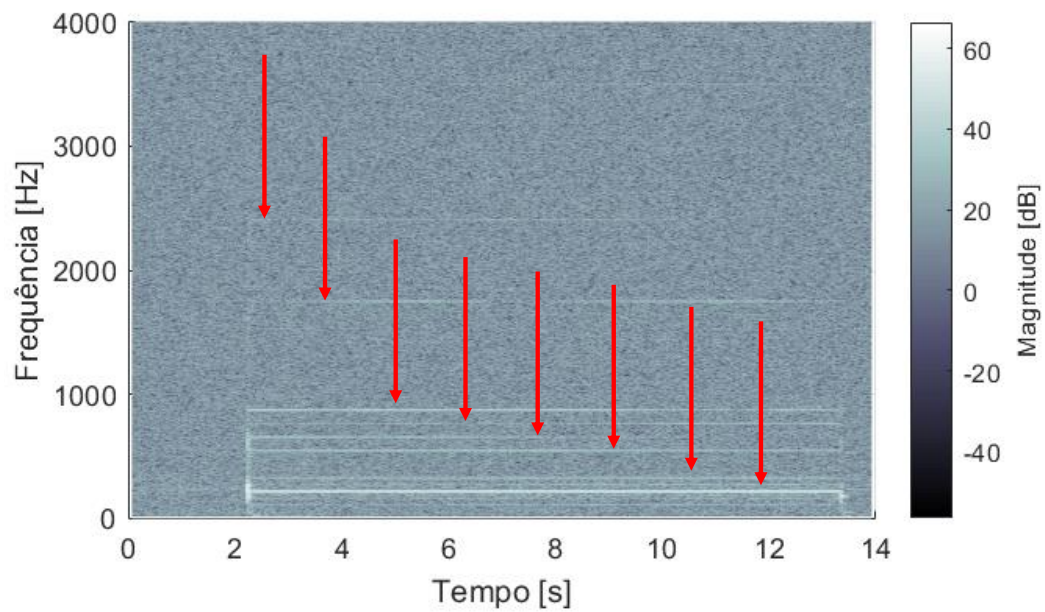


Figura 4.8: Gráfico STFT do sinal sonoro correspondente ao movimento no eixo Y.

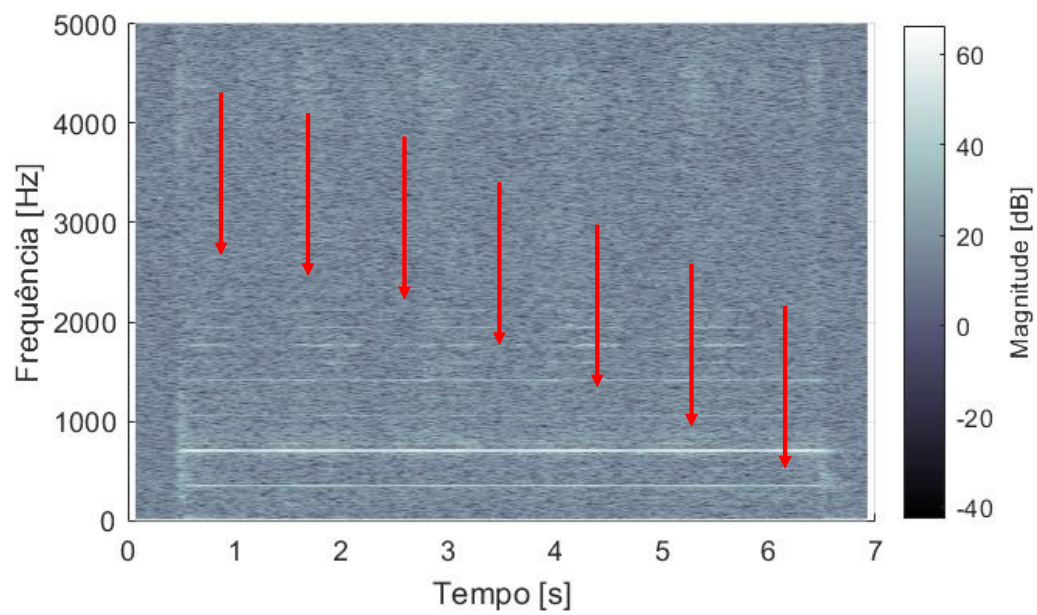


Figura 4.9: Gráfico STFT do sinal sonoro correspondente ao movimento no eixo Z.

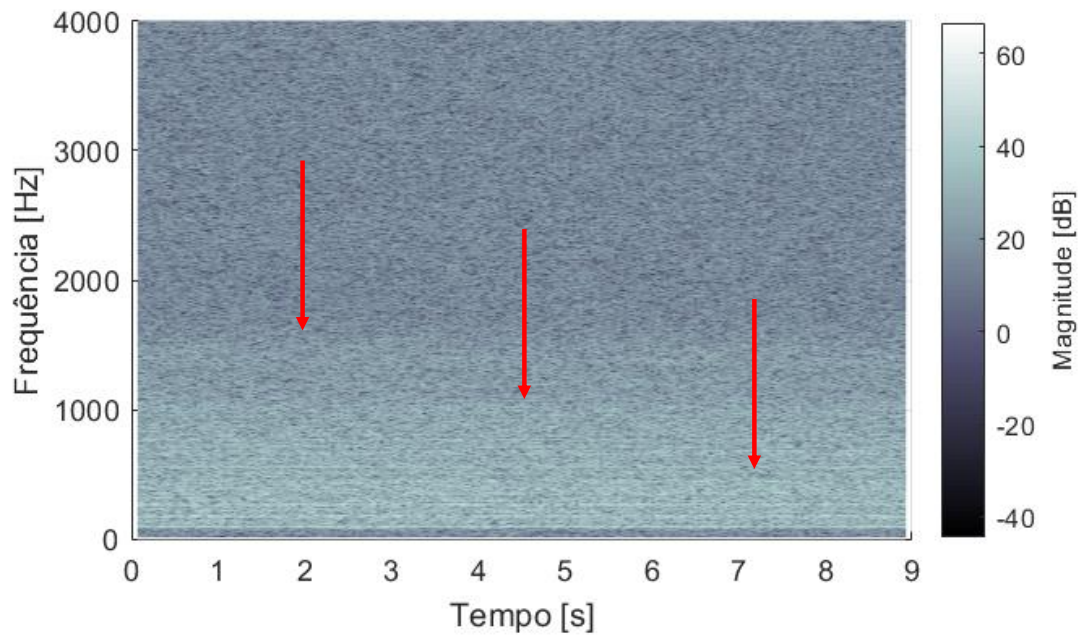


Figura 4.10: Gráfico STFT do sinal sonoro correspondente ao funcionamento do exaustor.

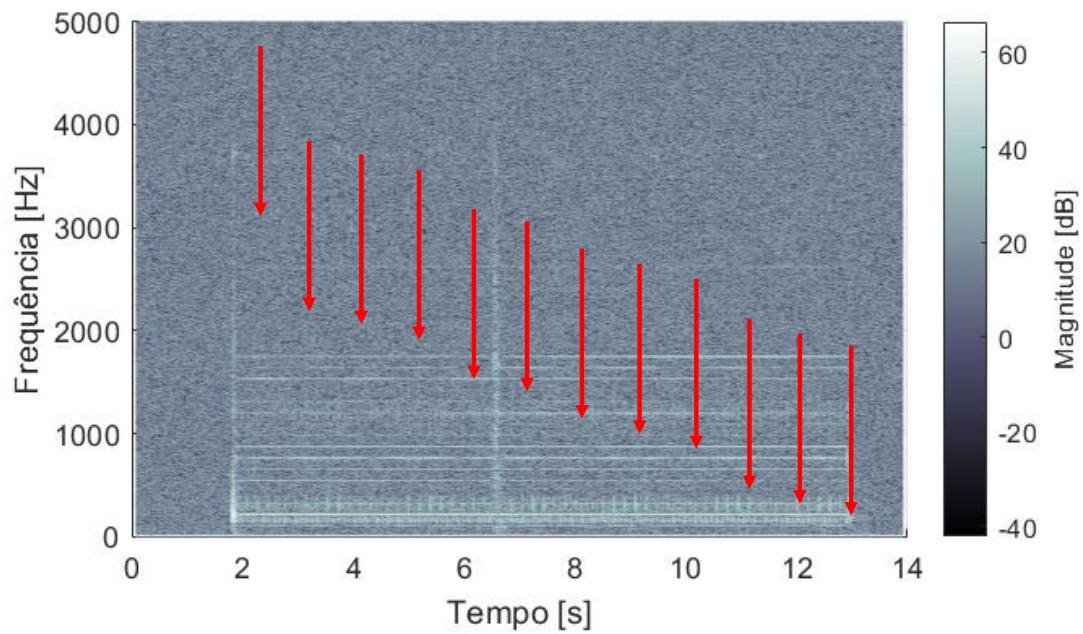


Figura 4.11: Gráfico STFT do sinal sonoro correspondente ao movimento da extrusora.

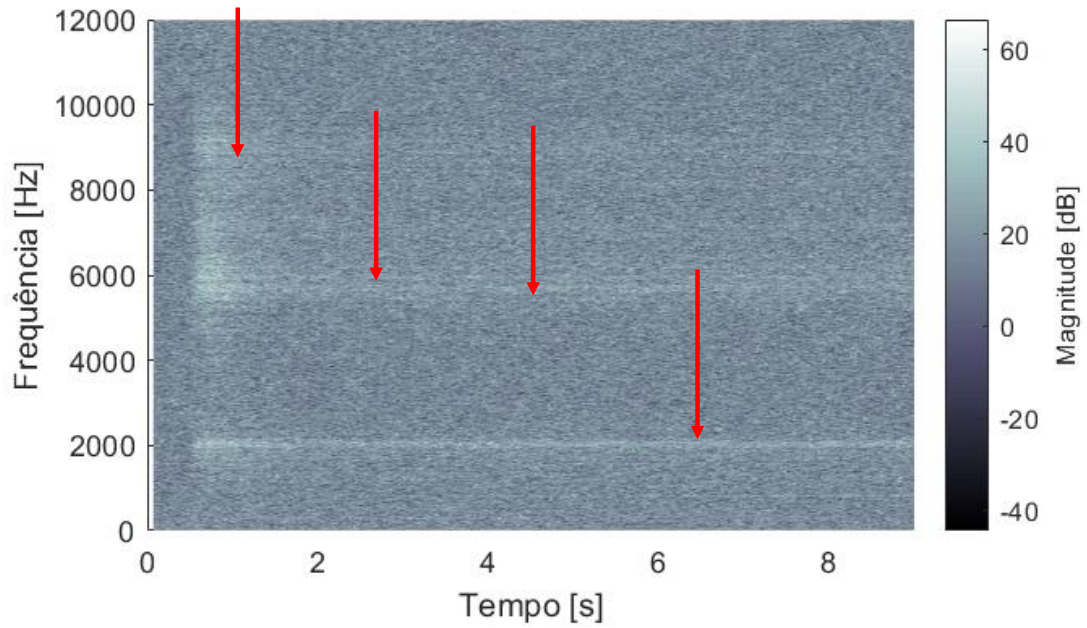


Figura 4.12: Gráfico STFT do sinal sonoro correspondente ao gás de proteção a ser libertado.

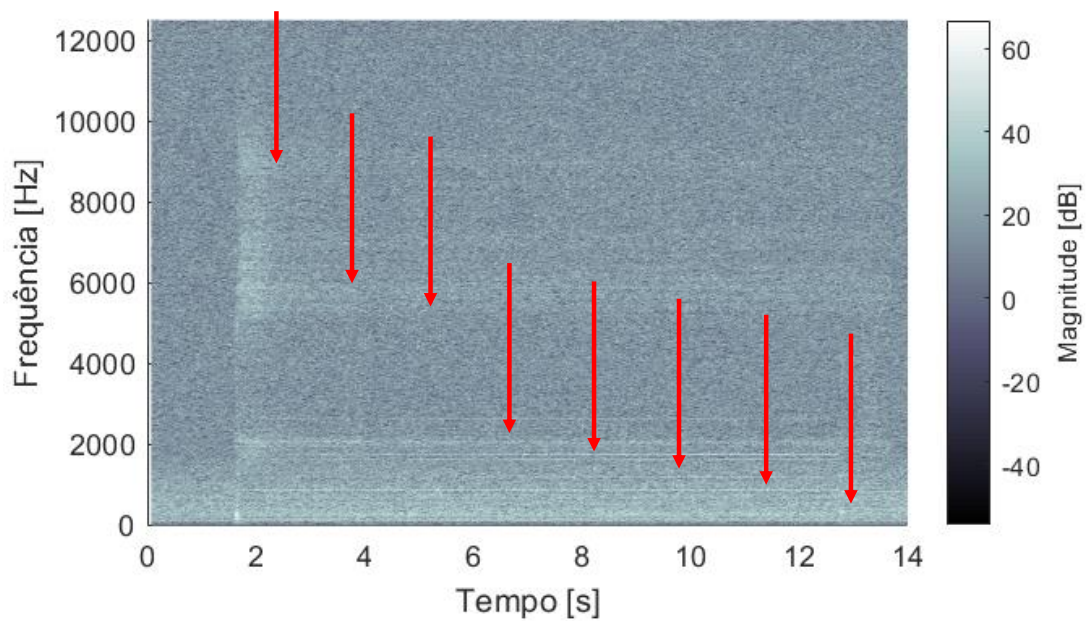


Figura 4.13: Gráfico STFT do sinal sonoro correspondente a todos os sistemas em funcionamento sem a criação de arco elétrico.

Analisando os gráficos presentes nas figuras 4.8 até 4.13 identificam-se faixas de cor mais clara presentes em cada gráfico, que correspondem às frequências características de cada sinal sonoro.

Registrando estes resultados e associando-os à respetiva fonte, posteriormente, será possível reconhecer a origem de determinadas frequências em espectros mais complexos.

4.2. Monitorização *Online*

4.2.1. Validação de Resultados

Antes de se poderem retirar conclusões a partir do sinal sonoro será pertinente validar os resultados relativos ao mesmo. Nesse sentido comparou-se o sinal sonoro com o sinal proveniente da tensão elétrica envolvida no processo.

É necessário relembrar as considerações admitidas no capítulo 2.5.2 e reconhecer que um pico positivo de corrente elétrica está associado a um pico negativo de tensão. Em suma, o esperado para validar os resultados será uma correspondência temporal entre picos de pressão sonora e picos de tensão elétrica.

A Figura 4.14 corresponde à comparação do sinal sonoro com o da tensão elétrica para o ensaio HH1.

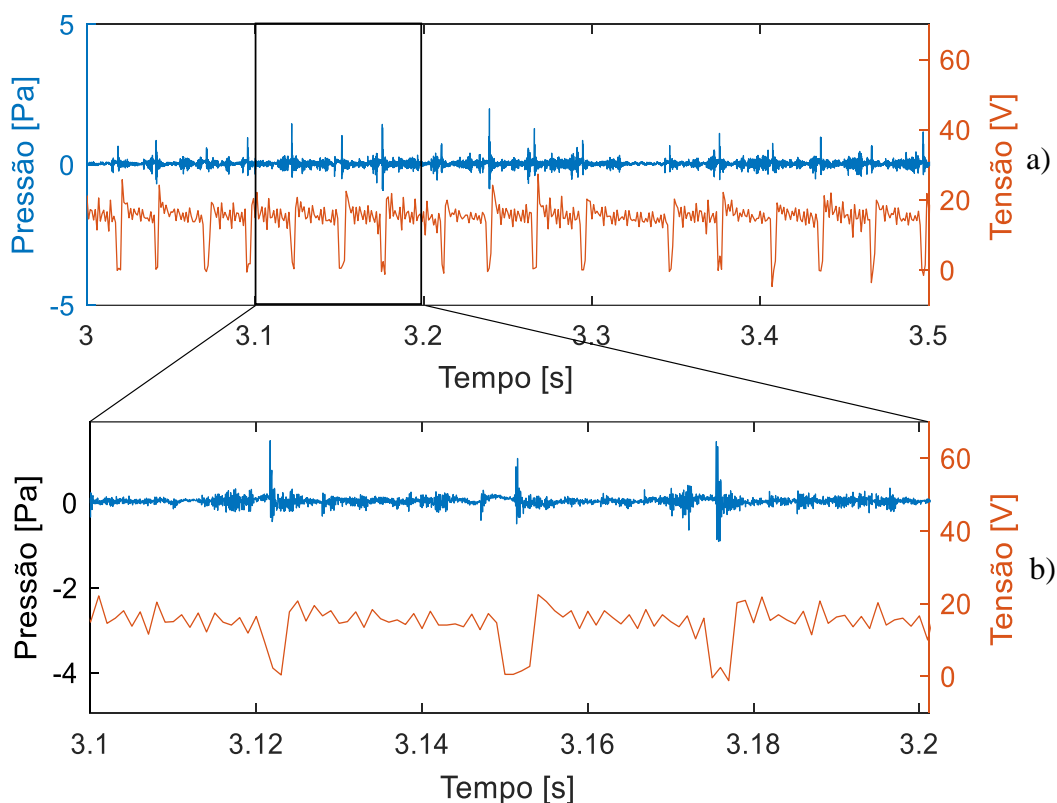


Figura 4.14: a) Comparação dos sinais de tensão elétrica e pressão sonora do ensaio HH1. b) Vista de aproximação (intervalo [3.1; 3.3] s)

Constata-se que os picos negativos de tensão elétrica acontecem no mesmo instante que os picos de pressão sonora.

Este procedimento foi executado para todos os sinais sonoros onde se obtiveram resultados semelhantes ao anterior. Tal permite concluir que o procedimento

experimental foi bem concebido e executado, conferindo segurança a possíveis conclusões retiradas sobre os mesmos.

4.2.2. Detecção de Defeitos

O objetivo desta dissertação reside na intenção de identificar e localizar anomalias em peças produzidas pelo processo WAAM e, se possível, classificar quanto ao tipo de defeito existente. Partindo desta premissa, será oportuno separar a análise dos ensaios para cada tipo de defeito imposto. Uma vez que se utilizaram diferentes parâmetros e realizaram-se ensaios para a deposição de apenas um cordão e para uma parede de dez cordões, é também necessário assumir como modelo os ensaios onde se produziram cordões ou paredes de referência.

Começando pelos ensaios com alta entrega térmica, onde se excluiu o gás de proteção na deposição de um cordão apresentam-se, na Figura 4.15, Figura 4.16 e Figura 4.17, os gráficos de Pressão/Tempo respectivos.

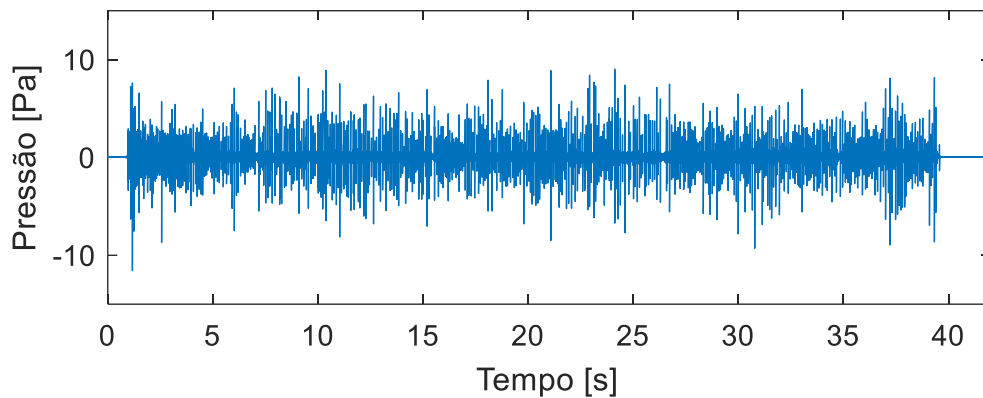


Figura 4.15: Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo ao ensaio HH1.

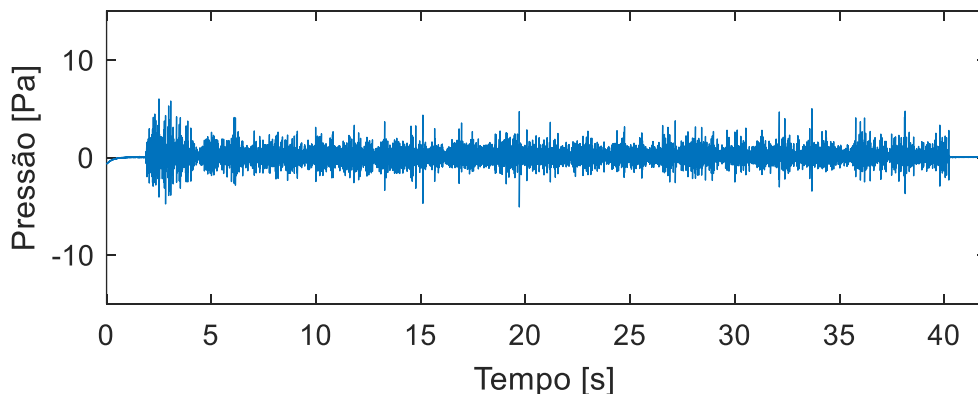


Figura 4.16: Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo ao ensaio HH2.

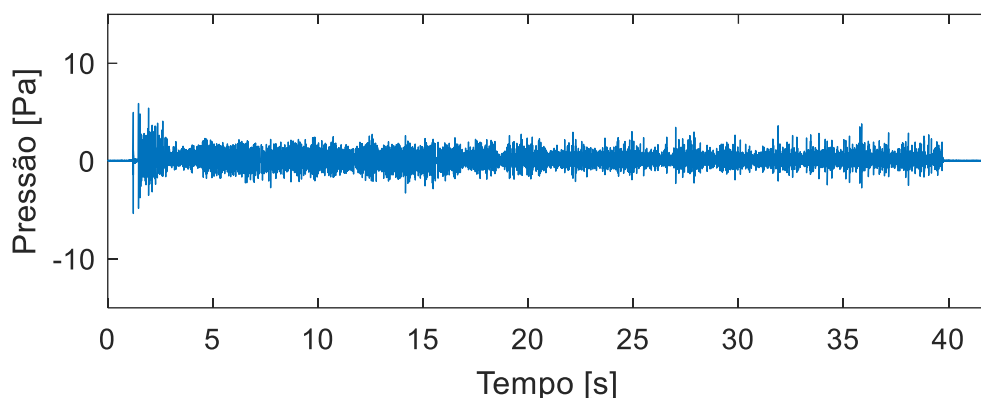


Figura 4.17: Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo ao ensaio HH3.

Analisando os gráficos nas Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 verifica-se a existência de disparidades no espectro sonoro na deposição de um cordão com e sem gás. Essas variações estão presentes não só na redução da amplitude do sinal, como no aumento da frequência de impulsos gerados pela criação do arco elétrico, quando não existe gás de proteção. No entanto, observa-se que, mesmo para um cordão bem parametrizado, o sinal não se mantém constante ao longo do tempo. Esta característica torna ainda mais difícil a compreensão das consequências associadas à falta de gás de proteção.

Com o intuito de resolver esse problema, selecionaram-se duas parcelas do sinal adquirido no ensaio HH3. A primeira parcela corresponde a um instante associado à deposição do troço com gás de proteção, enquanto que a segunda parcela diz respeito à deposição da parte sem gás de proteção. Em seguida, transformaram-se ambas as porções do sinal utilizando a FFT e compararam-se os gráficos obtidos, assim como esquematizado na Figura 4.18.

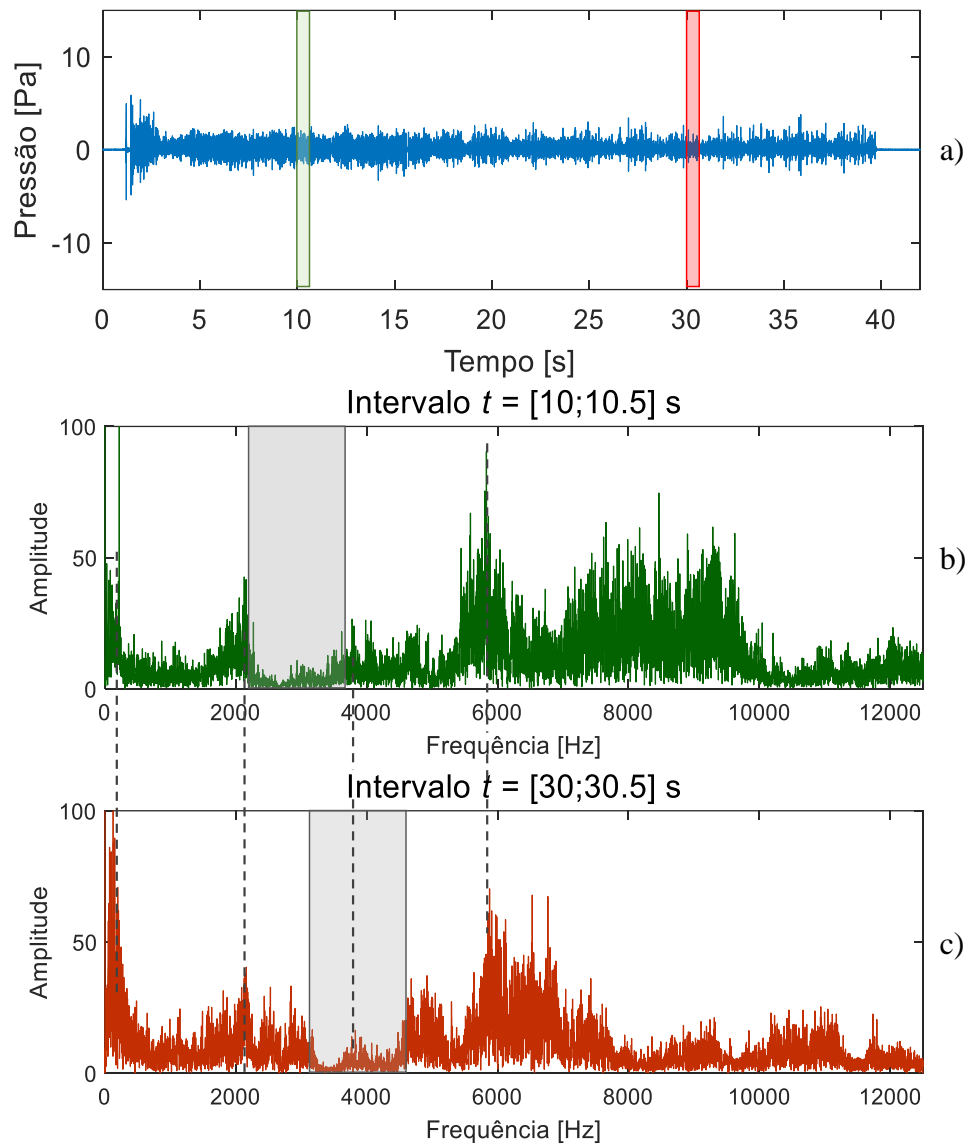


Figura 4.18: a) Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo ao ensaio HH3. b) Gráfico FFT do intervalo de tempo [10 ; 10.5] (gráfico a cor verde). c) Gráfico FFT do intervalo de tempo [30 ; 30.5] (gráfico a cor vermelha).

Em ambos os gráficos FFT é possível observar a existência de picos correspondentes ao mesmo valor de frequência, no entanto, a ocorrência de variações no espectro de frequências do sinal proveniente de uma deposição de referência para uma deposição sem gás de proteção é bastante notória. Destaca-se a região identificada pelo retângulo a cinzento, que será esmiuçado posteriormente, e a gama de frequências entre 6000 Hz e 12000 Hz.

Para permitir obter uma perspectiva geral do sucedido ao longo de todo o instante de tempo, transformaram-se os gráficos da Figura 4.15, Figura 4.16 e Figura 4.17 aplicando a ferramenta STFT, onde se compararam os gráficos resultantes com uma vista de cima do cordão respetivo. A Figura 4.19, Figura 4.20 e Figura 4.21 correspondem aos ensaios HH1, HH2 e HH3, respetivamente.

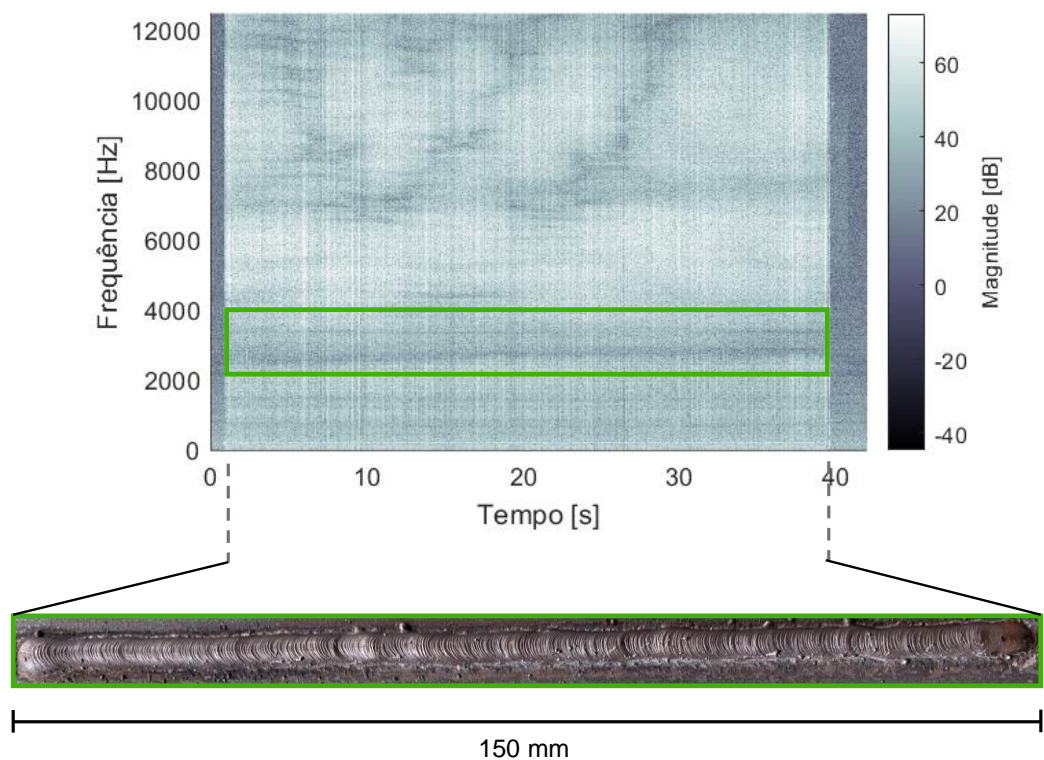


Figura 4.19: Gráfico STFT e vista de cima do cordão do ensaio HH1.

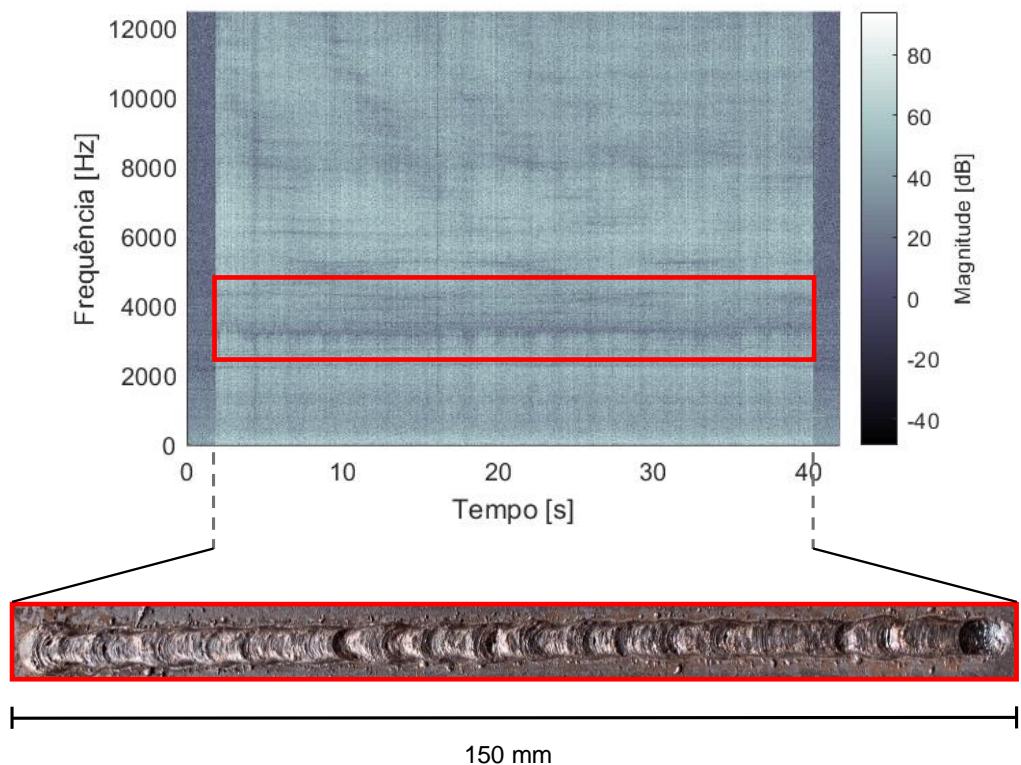


Figura 4.20: Gráfico STFT e vista de cima do cordão do ensaio HH2.

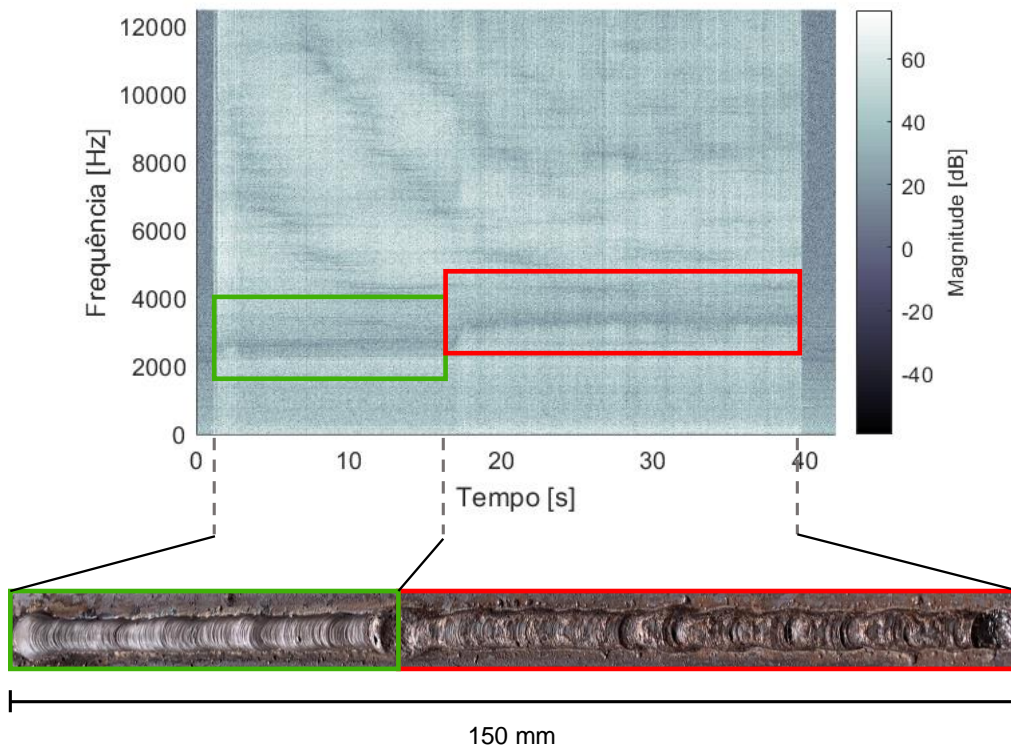


Figura 4.21: Gráfico STFT e vista de cima do cordão do ensaio HH3.

Observando a Figura 4.19 identifica-se uma zona onde o sinal tem amplitude reduzida a frequências perto de 3000 Hz (zona mais escura). Passando para a Figura 4.20 repara-se que esta zona sofre uma translação no sentido positivo do eixo da frequência, passando agora para perto de 4000 Hz. As duas zonas encontram-se identificadas com um retângulo verde e vermelho, para o ensaio otimizado (HH1) e com falta de gás de proteção (HH2), respetivamente.

Como forma de validação, analisa-se agora a Figura 4.21. Perto de 19 segundos consta-se uma translação no sentido positivo do eixo da frequência da zona mais escura para os mesmos valores referidos anteriormente. Este resultado é espectralmente uma vez que esta translação acontece no mesmo instante em que se interrompeu o caudal de gás de proteção no processo.

Comparando os gráficos com as respetivas vistas superiores do cordão é possível associar este fenómeno à qualidade do cordão produzido, uma vez que para o primeiro ensaio o cordão tem bom aspeto, para o segundo o cordão encontra-se repleto de porosidades e para o terceiro, o troço de cordão com porosidades tem comprimento correspondente ao intervalo de tempo onde ocorre a translação da zona mais escura.

Este fenómeno também é verificado através da ferramenta FFT (Figura 4.18), pois constata-se uma translação da região identificada com um retângulo a cinzento (3000 Hz e 4000Hz) entre os troços com e sem gás de proteção. No entanto, descartaram-se as variações ocorridas na região entre 6000 Hz e 12000 Hz. Observando os gráficos STFT correspondentes às Figuras 4.19, 4.20 e 4.21, constata-se o aparecimento de faixas mais escuras com forma e distribuição aleatória sem causa ou significado conhecido. Contudo,

este acontecimento conduz à incerteza na atribuição das amplitudes correspondentes a dada frequência, pois nada garante que o aparecimento de frequências com baixas ou elevadas amplitudes se deve de facto a um defeito.

Relativamente aos ensaios HH8 e HH9 procedeu-se de forma análoga, especialmente para a 10ª camada, onde se obtiveram resultados semelhantes aos anteriores. No entanto, para constatar o aparecimento de defeitos na 5ª camada, retirou-se uma amostra da secção transversal para cada ensaio. As mesmas consistiram em troços com 10 mm cortados perpendicularmente ao comprimento das paredes na região, onde o cordão foi depositado sem gás de proteção. Posteriormente foram envoltas em resina e polidas para facilitar a identificação de defeitos.

Na Figura 4.22 e Figura 4.23, representam-se os gráficos STFT da deposição da 5ª camada, a vista de cima das paredes e as amostras para cada ensaio, HH8 e HH9 respetivamente.

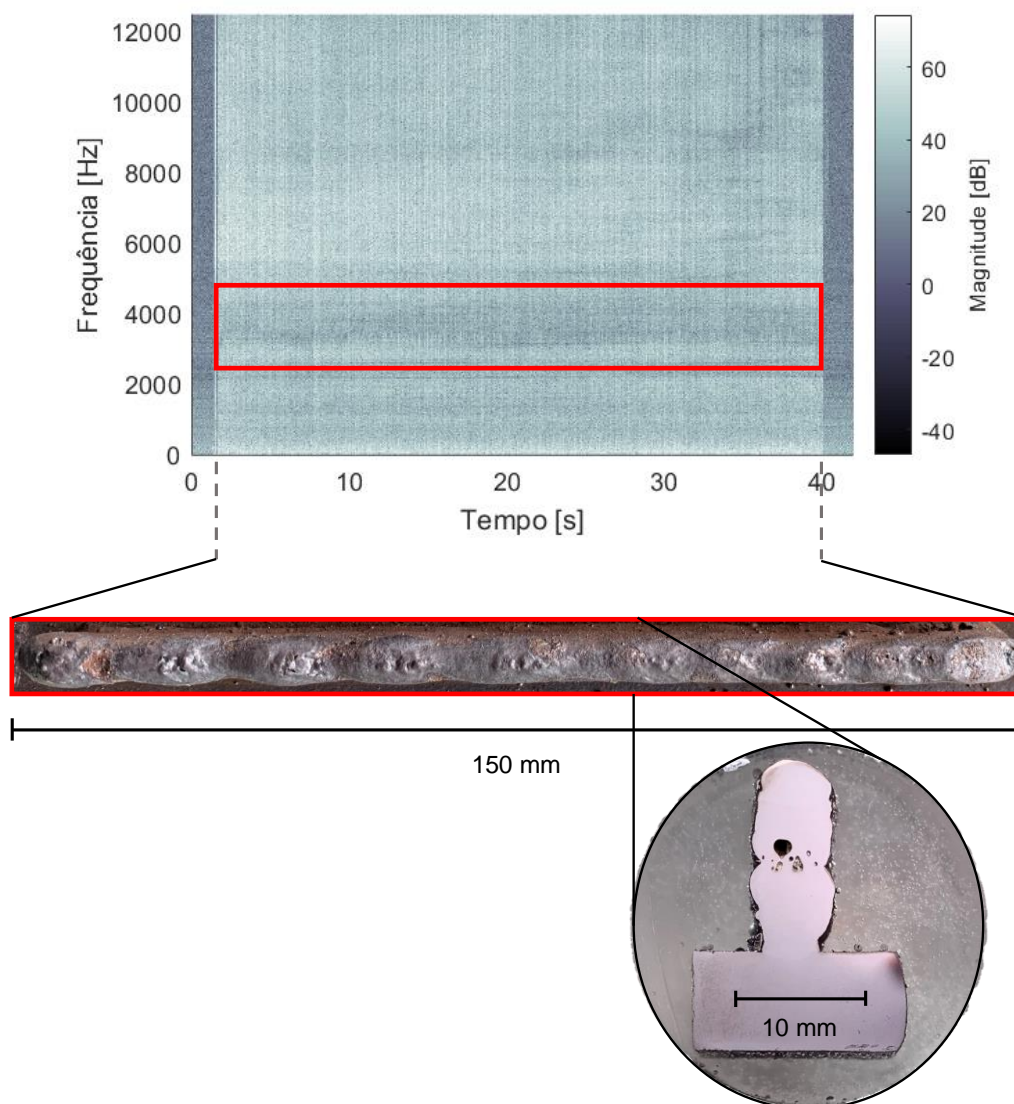


Figura 4.22: Gráfico STFT da deposição da 5ª camada, vista de cima do cordão e respetiva amostra do ensaio HH8.5.

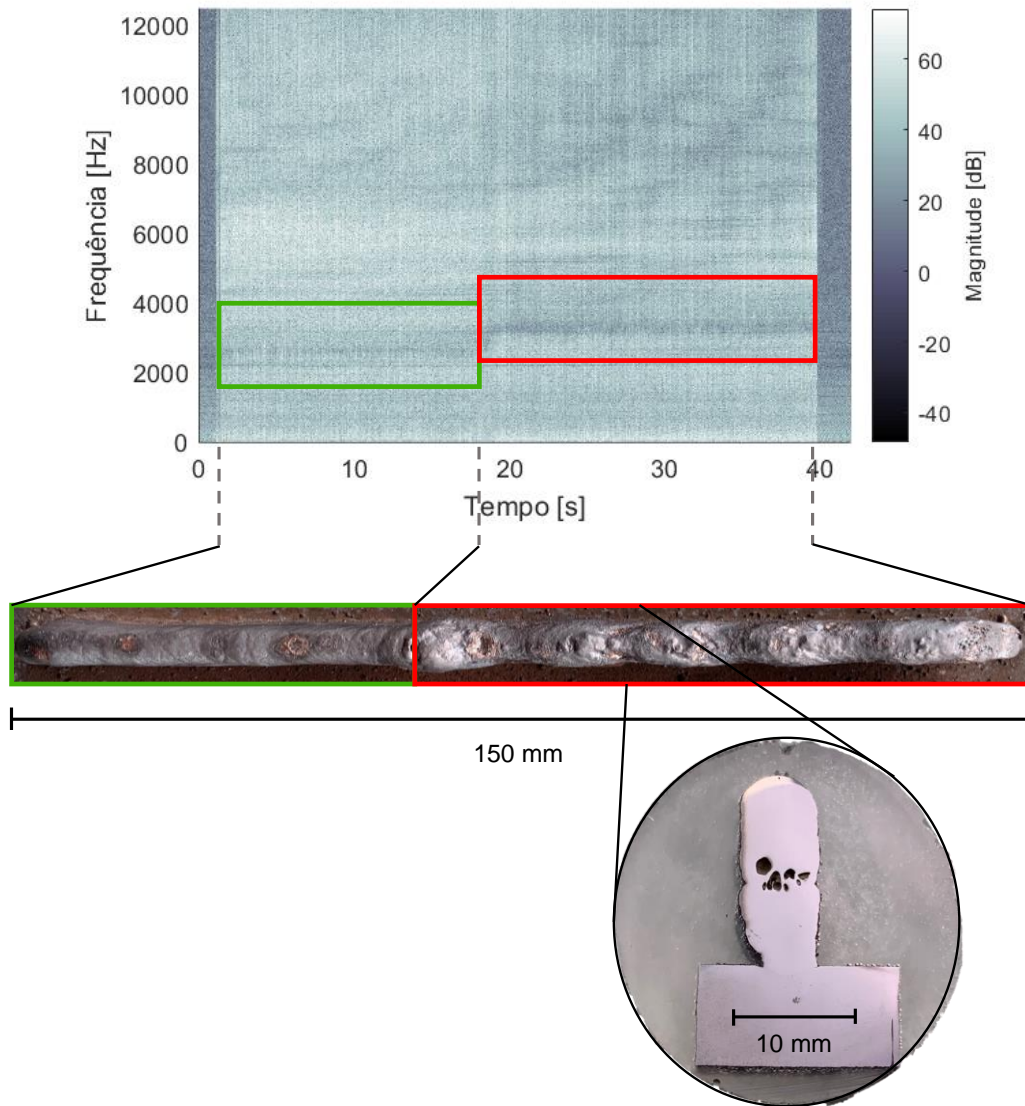


Figura 4.23: Gráfico STFT da deposição da 5ª camada, vista de cima do cordão e respectiva amostra do ensaio HH9.5.

Constata-se, novamente, nos gráficos STFT do espectro sonoro relativo à 5ª camada dos ensaios HH8 e HH9, o fenómeno de translação referido anteriormente. Paralelamente encontram-se presentes poros a meia altura das paredes de ambos os ensaios, evidenciando a má formação da 5ª camada.

Conclui-se, uma vez mais, que o sucedido no espectro sonoro reflete a existência de defeitos associados à falta de gás de proteção.

Passando agora para os ensaios onde se depositou pó de giz da superfície, apresentam-se a Figura 4.24, Figura 4.25, Figura 4.26 e Figura 4.27, correspondentes os gráficos STFT dos ensaios HH4, HH5, HH6 e HH10.5, respetivamente.

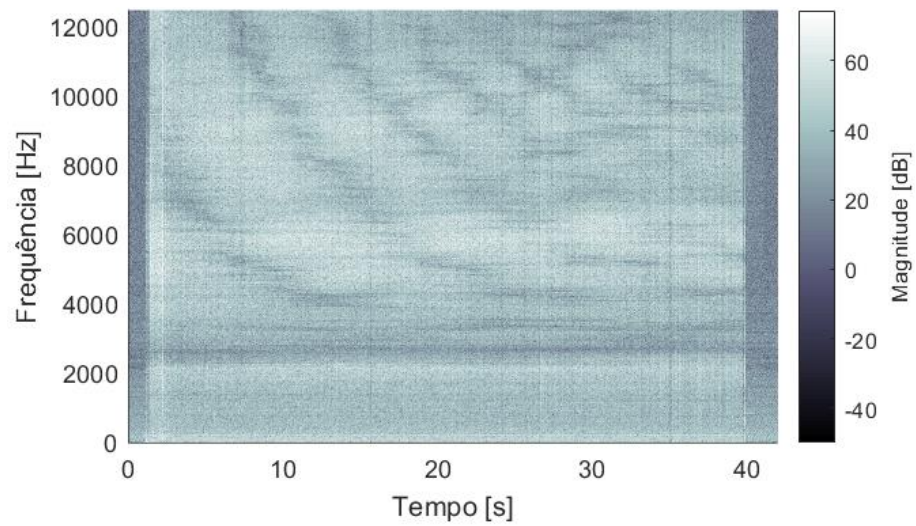


Figura 4.24: Gráfico STFT do ensaio HH4.

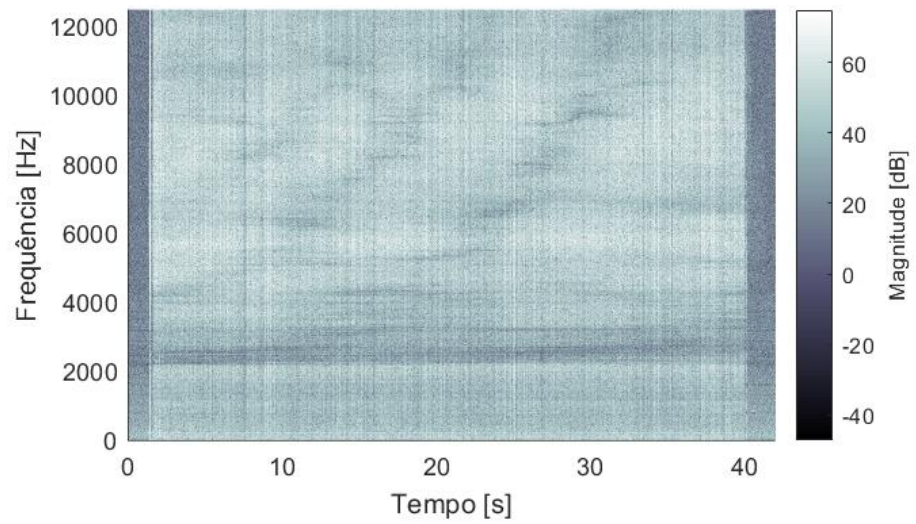


Figura 4.25: Gráfico STFT do ensaio HH5.

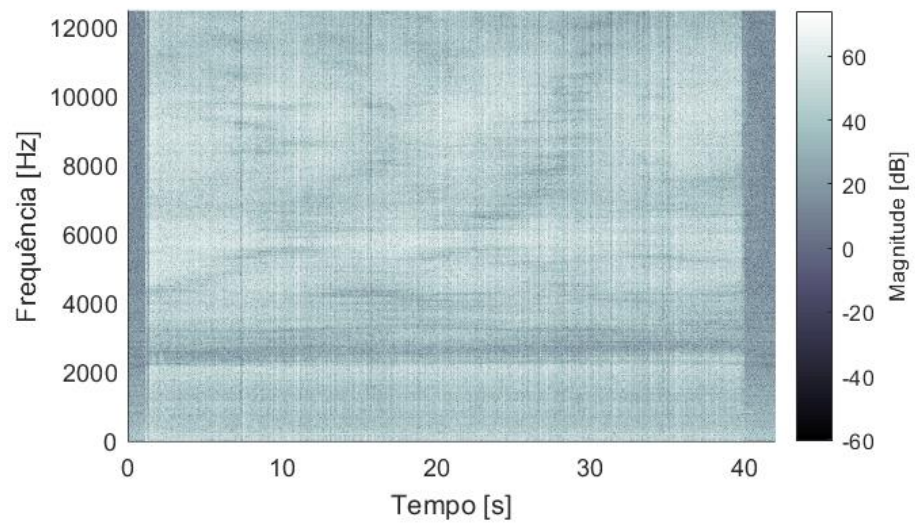


Figura 4.26: Gráfico STFT do ensaio HH6.

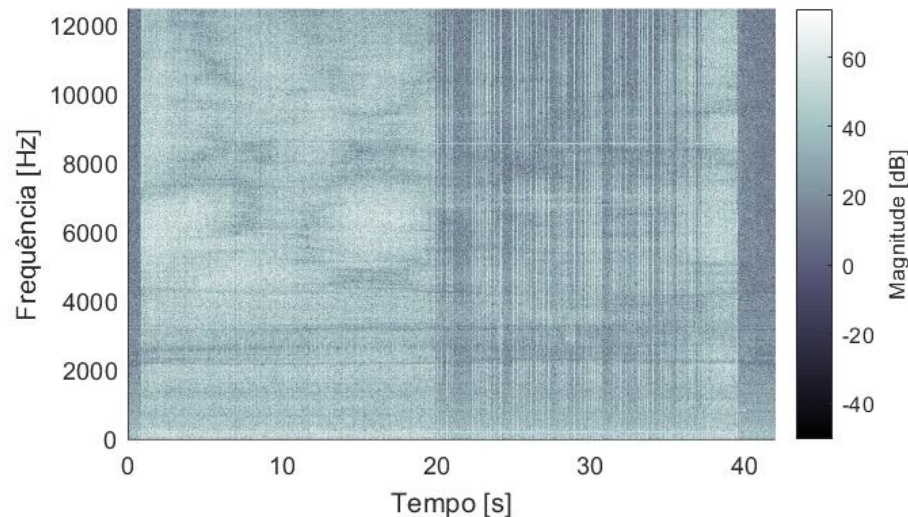


Figura 4.27: Gráfico STFT do ensaio HH10.5.

Sabendo que a metodologia adotada para a simulação de defeitos nos ensaios HH4, HH5 e HH6 foi a mesma utilizada para a 5ª e 10ª camada dos ensaios HH10, HH11 e HH12, seria de esperar uma repetição nos resultados obtidos. Na verdade, não se verifica uma correspondência dos resultados onde se deposita apenas 1 cordão relativamente aos ensaios onde são depositados 10 cordões. Observando o gráfico relativo ao ensaio HH10.5 constatam-se sucessivas interrupções ao longo do intervalo de tempo correspondente ao troço onde se depositou pó de giz na superfície. Tal acontece, pois, o pó de giz atua como camada isolante que não permite a corrente elétrica passar do eletrodo para o substrato, impedindo a formação do arco elétrico. Analisando os gráficos relativos aos ensaios HH4, HH5 e HH6 repara-se que este fenómeno não ocorreu de forma tão evidente.

Conclui-se que para a obtenção de defeitos deste tipo é necessária uma boa adesão do pó de giz ao substrato, o que para o caso da deposição no substrato sob a forma de chapa não acontece. Para o caso onde o substrato corresponde ao cordão depositado anteriormente, neste caso 4ª e 9ª camada, este requisito já se verifica, uma vez que a rugosidade e a temperatura do material se apresentam mais elevadas. Descartam-se, assim, os resultados relativos a HH4, HH5 e HH6 e concentra-se a atenção nos ensaios HH10, HH11 e HH12.

Como executado anteriormente e assim como representado na Figura 4.28 utiliza-se a ferramenta FFT para analisar dois intervalos do sinal sonoro, um intervalo correspondente a uma porção da deposição bem parametrizada e outro associado à uma parcela com pó de giz no substrato. Neste caso, o ensaio analisado foi o HH12.10.

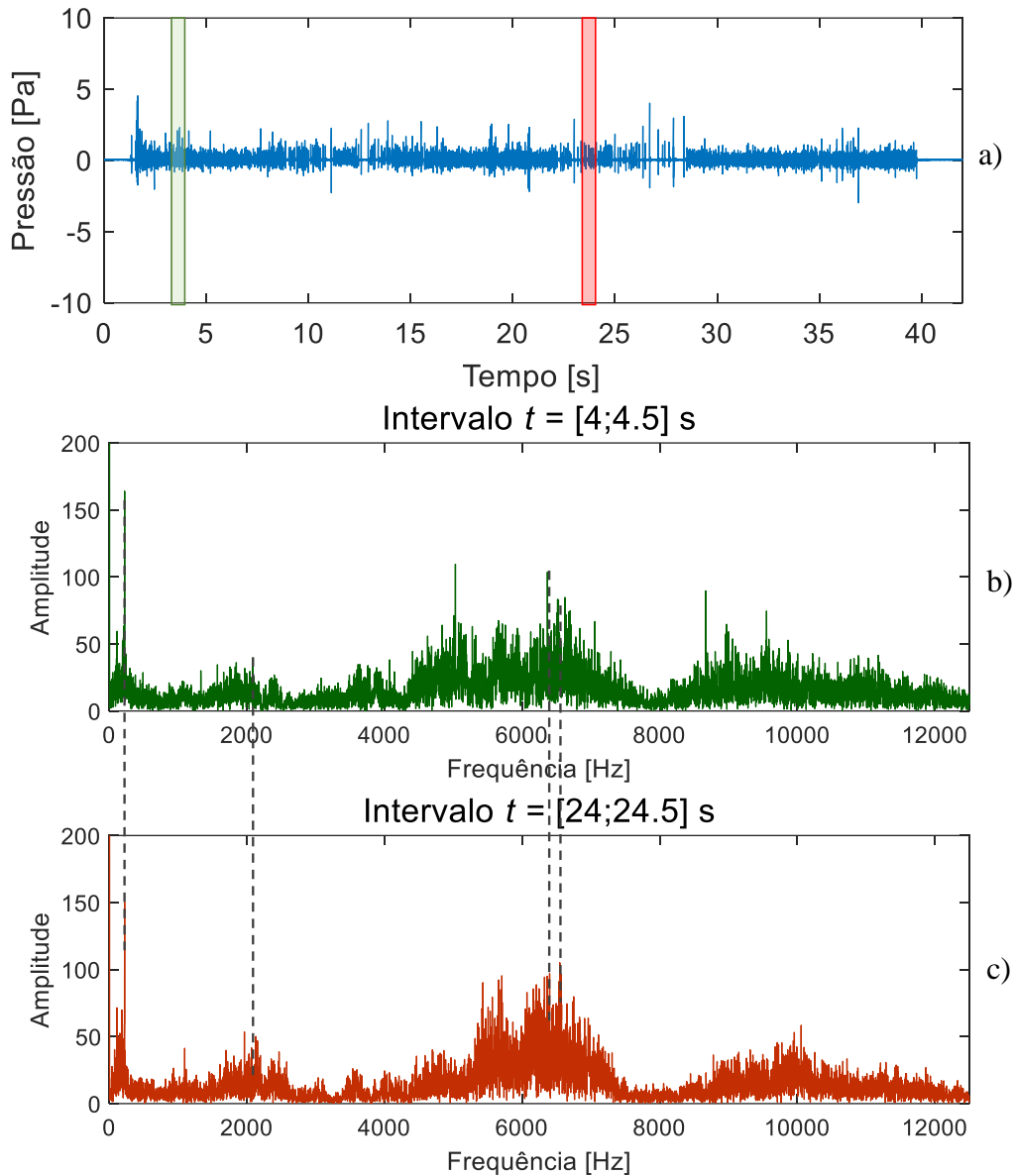


Figura 4.28: a) Gráfico Pressão sonora/Tempo relativo ao ensaio HH12.10. b) Gráfico FFT do intervalo de tempo [4 ; 4.5] (gráfico a cor verde). c) Gráfico FFT do intervalo de tempo [24 ; 24.5] (gráfico a cor vermelha).

De acordo com a Figura 4.28 repara-se que não existem variações drásticas entre o espectro das frequências do som proveniente da deposição com e sem giz. No entanto, verifica-se que algumas das frequências com maiores amplitudes, para a deposição bem executada, passam a ter amplitudes inferiores para o gráfico associado à parcela com giz no substrato. Contudo, estas variações não poderão ser associadas diretamente a possíveis defeitos uma vez que, ao longo de uma deposição de um cordão bem parametrizado, as frequências características associadas ao sinal proveniente do mesmo variam. Para comprovar o suprarreferido, apresenta-se a Figura 4.29, 4.30, 4.31 e 4.32 que corresponde aos gráficos resultantes da Transformada Rápida de Fourier para os intervalos [5 ; 5.5]s, [10 ; 10.5]s, [20 ; 20.5]s e [30 ; 30.5]s do espectro sonoro de um ensaio bem parametrizado (ensaio HH7.10), respetivamente.

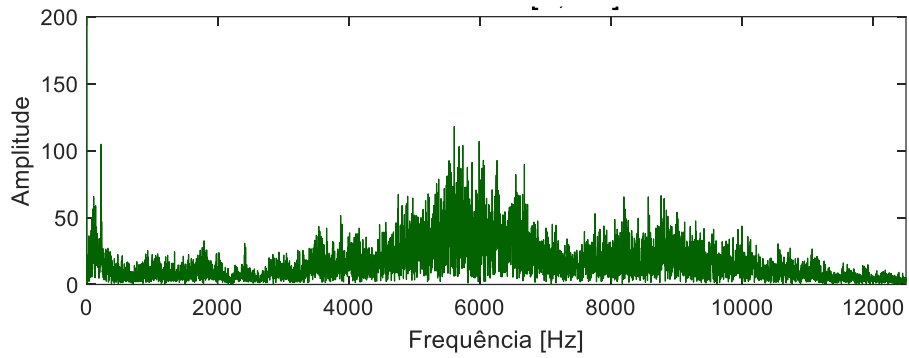


Figura 4.29: Gráfico FFT do intervalo de tempo [5 ; 5.5] s do sinal sonoro relativo ao ensaio HH7.10.

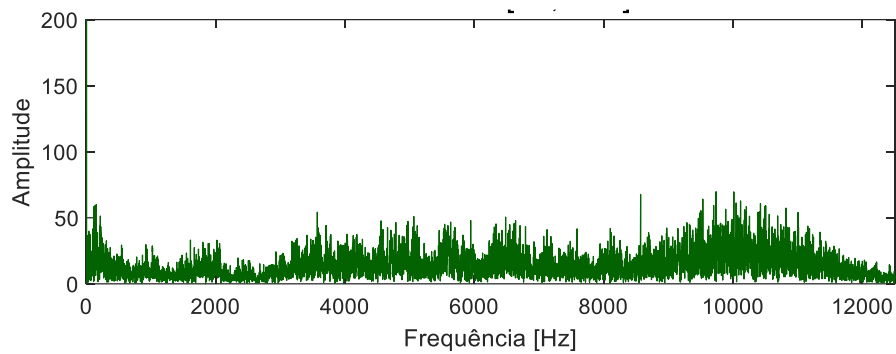


Figura 4.30: Gráfico FFT do intervalo de tempo [10 ; 10.5] s do sinal sonoro relativo ao ensaio HH7.10.

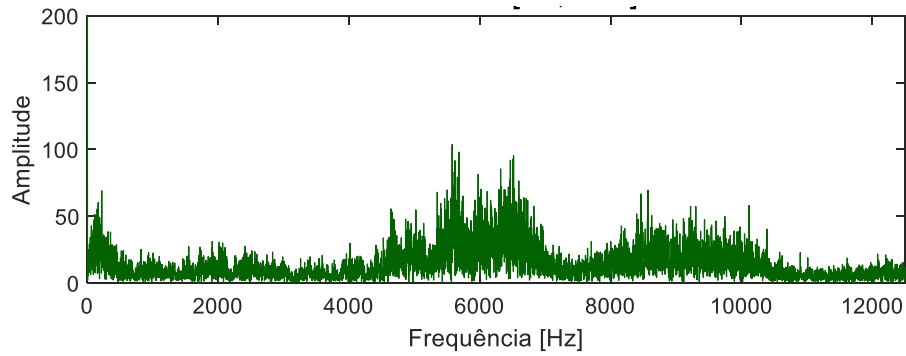


Figura 4.31: Gráfico FFT do intervalo de tempo [20 ; 20.5] s do sinal sonoro relativo ao ensaio HH7.10.

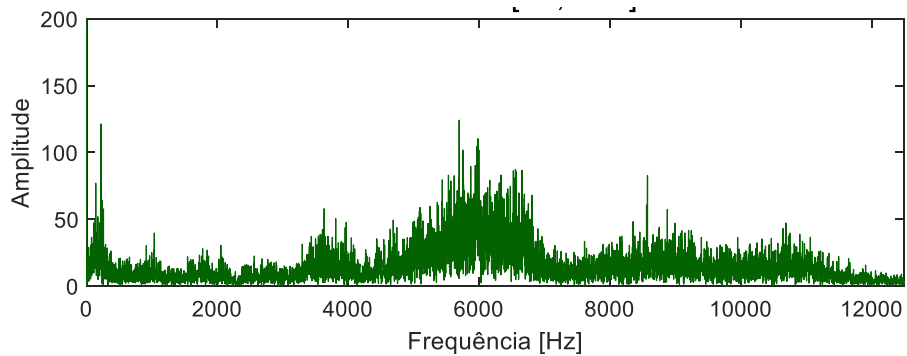


Figura 4.32: Gráfico FFT do intervalo de tempo [30 ; 30.5] s do sinal sonoro relativo ao ensaio HH7.10.

De uma perspectiva grosseira, as regiões do espectro de frequências com maior e menor amplitude mantem-se para todos os intervalos do sinal. Porém, fazendo uma análise mais detalhada, repara-se que as amplitudes associadas a cada frequência sofrem alterações significativas.

Para se contemplar os efeitos do pó de giz no sinal sonoro emitido em cada ensaio, apresentam-se na Figura 4.33, Figura 4.34 e Figura 4.35, os gráficos STFT relativos à 10ª camada e vista superior da parede obtida nos ensaios HH10.10, HH11.10 e HH12.10, respetivamente.

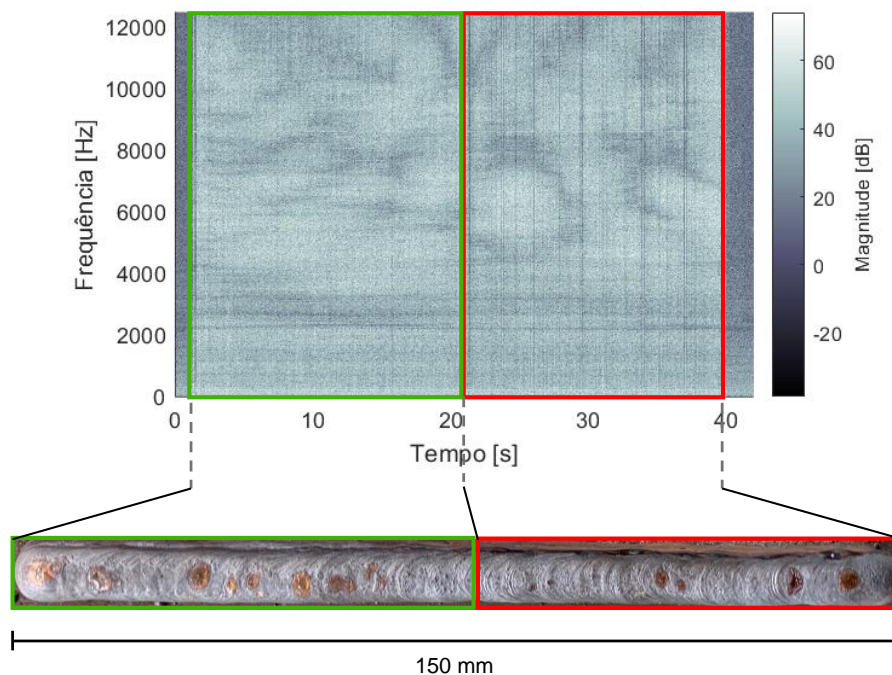


Figura 4.33: Gráfico STFT e vista de cima da parede do ensaio HH10.10.

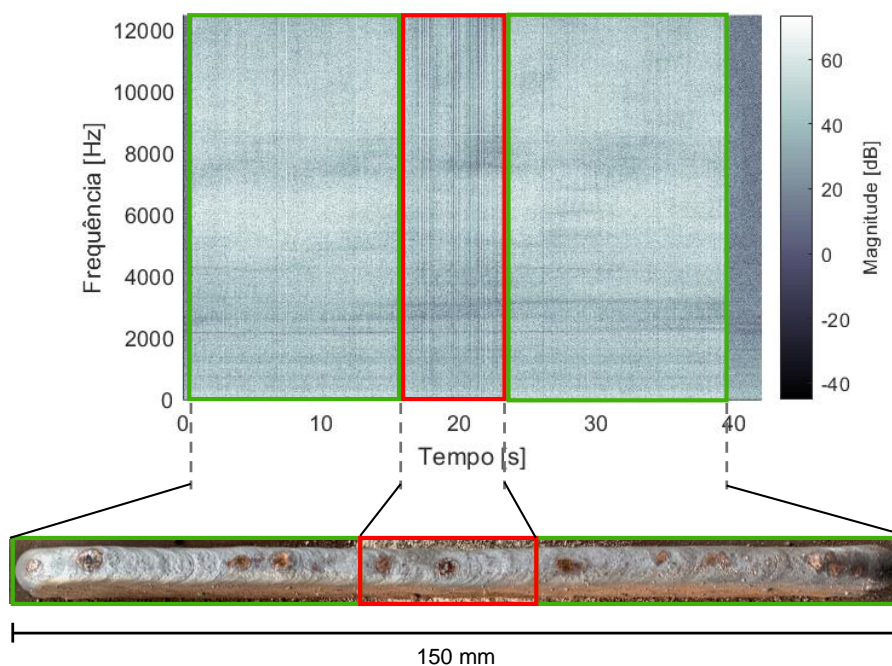


Figura 4.34: Gráfico STFT e vista de cima da parede do ensaio HH11.10.

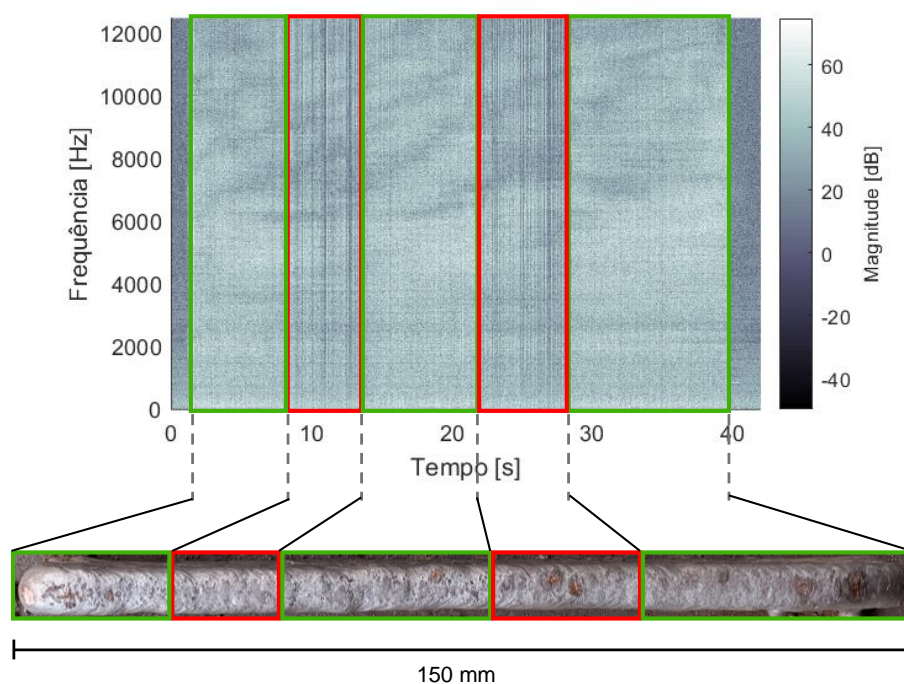


Figura 4.35: Gráfico STFT e vista de cima da parede do ensaio HH12.10.

Apesar de ser perceptível a identificação de zonas onde se depositou o pó de giz nos gráficos relativos ao processamento do som, observando a superfície superior da parede não são identificadas zonas que evidenciem uma má formação do cordão. Tal acontece, pois, as interrupções provocadas pelo giz não são suficientemente prolongadas para provocar irregularidade na deposição do material de adição.

Relativamente à 5ª camada obtiveram-se resultados semelhantes aos adquiridos para a 10ª, no entanto, será impossível identificar os defeitos na mesma, uma vez que a deposição das camadas posteriores irá cobrir possíveis anomalias. Nesse sentido produziram-se amostras semelhantes às desenvolvidas anteriormente com o objetivo de identificar defeitos visíveis à vista desarmada e ainda observar a microestrutura das zonas afetadas pelo giz.

Analisando a amostra correspondente ao ensaio HH12 (Fig. 4.27) observa-se que não existem defeitos visíveis a olho nu, contrariamente ao obtido nos ensaios onde se retirou o gás de proteção.

No que diz respeito à microestrutura, examinaram-se as zonas correspondentes às camadas onde se depositou pó de giz e as camadas bem executadas. Na Figura 4.36 apresenta-se a microestrutura da 5ª e da 2ª camadas, Figura 4.28 b) e c) e Figura 4.28 d) e e), respetivamente.

Observando as figuras relativas ao destaque inferior (2ª camada) identifica-se uma microestrutura maioritariamente composta por ferrite e perlite. Em relação à ferrite, a mesma apresenta-se com uma morfologia acicular e granular, enquanto que a perlite exhibe-se com diferentes graus de aspereza, relacionados com os rácios de arrefecimento.

Analisando a microestrutura da 5ª camada verifica-se a inexistência de diferenças significativas entre a microestrutura das camadas afetadas pelo giz e as bem executadas, uma vez que ambas apresentam as mesmas características.

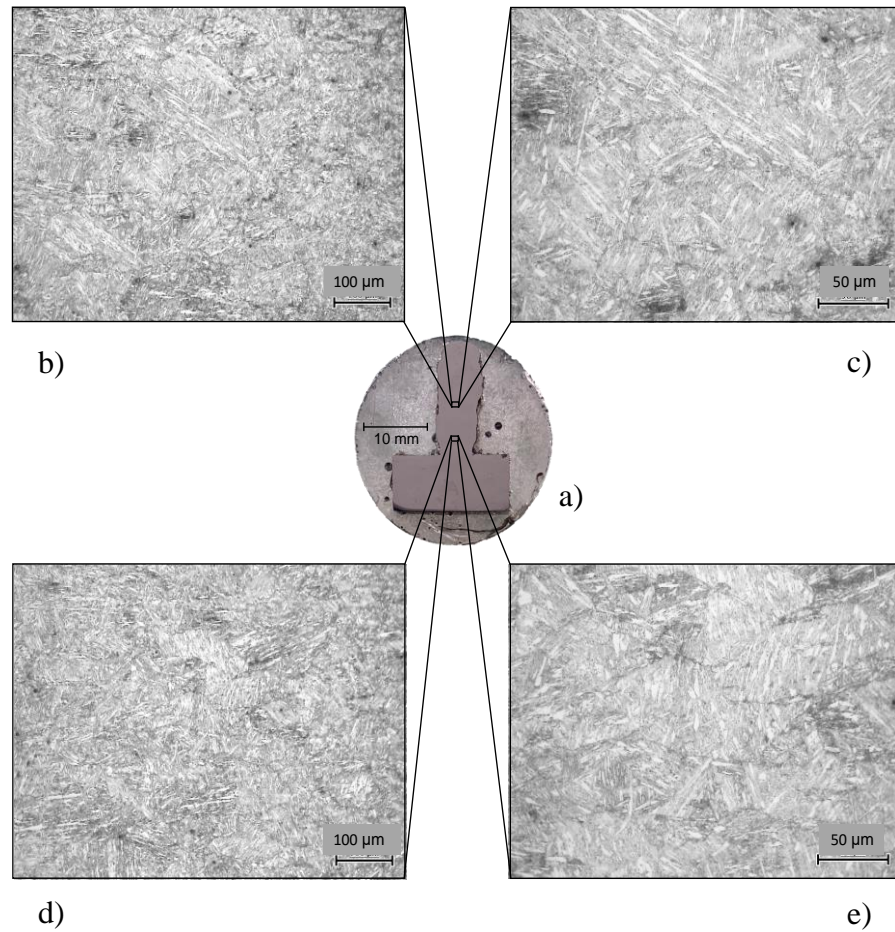


Figura 4.36: a) Amostra do ensaio HH12. b) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (100 µm). c) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (50 µm). d) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (100 µm). e) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (50 µm).

Obtiveram-se resultados semelhantes para os ensaios HH10 e HH11, como apresentado na Figura 4.37 e Figura 4.38, respectivamente.

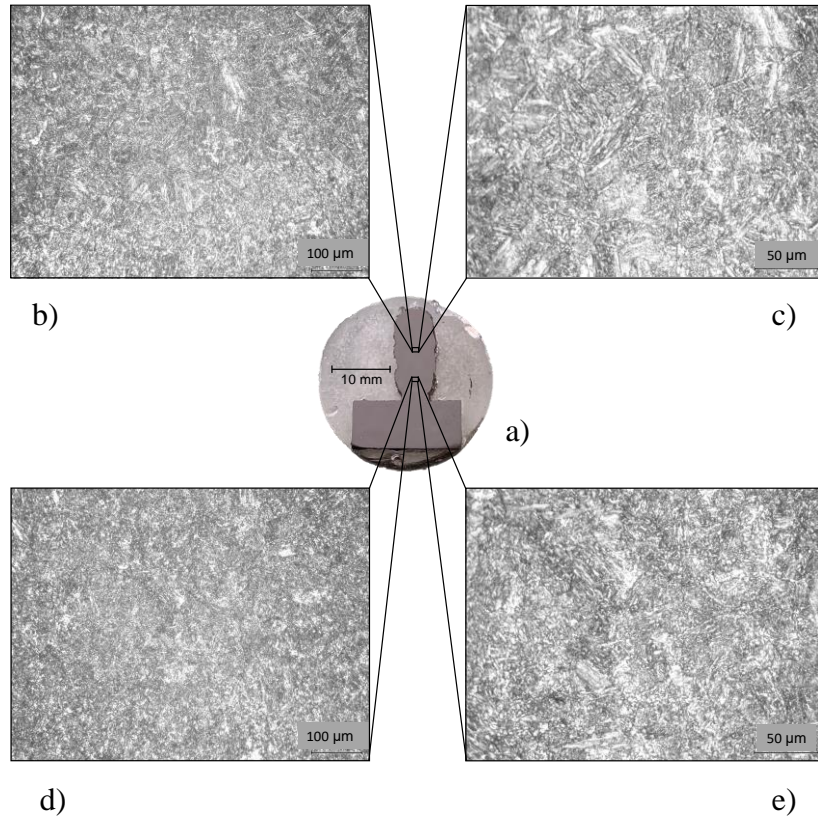


Figura 4.37: a) Amostra do ensaio HH10. b) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (100 μm). c) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (50 μm). d) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (100 μm). e) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (50 μm).

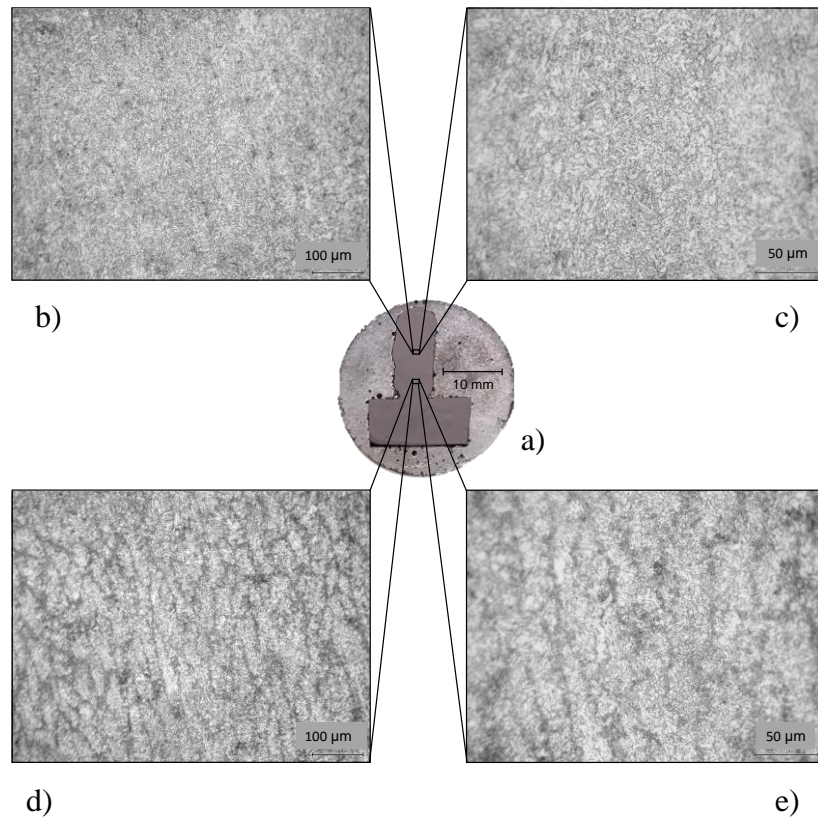


Figura 4.38: a) Amostra do ensaio HH11. b) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (100 μm). c) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (50 μm). d) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (100 μm). e) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (50 μm).

Para aos ensaios com baixa entrega térmica, os resultados alcançados foram em tudo semelhantes aos anteriores. Assim como para os ensaios com elevada entrega térmica, começa-se por analisar os ensaios onde se interrompeu o gás de proteção. Verificam-se os mesmos resultados, sumariamente, fazendo apenas a análise dos ensaios LH8 e LH9.

Na Figura 4.39 e Figura 4.40, representam-se os gráficos STFT, a vista de cima das paredes e as amostras para cada ensaio, LH8 e LH9 respetivamente.

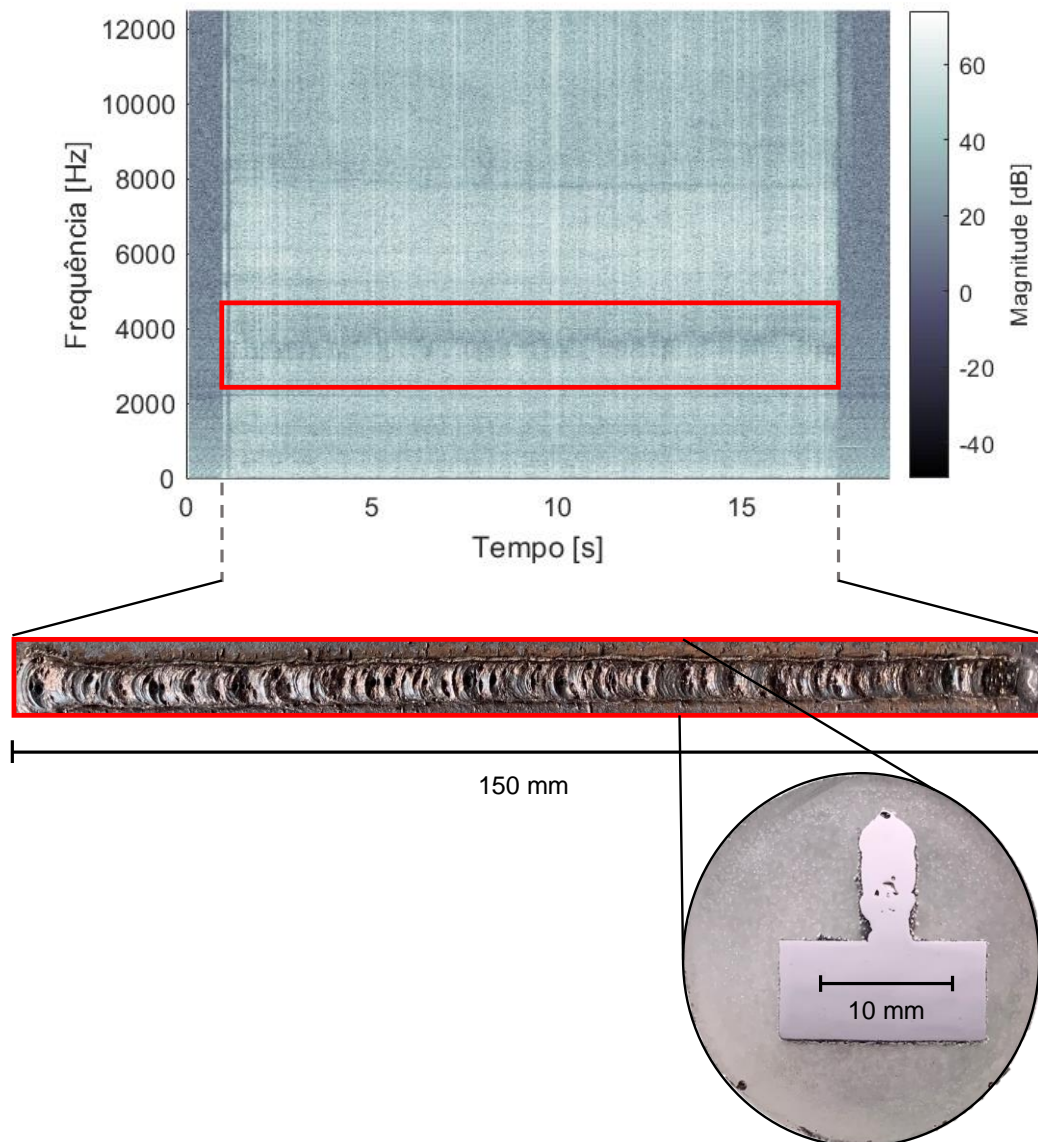


Figura 4.39: Gráfico STFT, vista de cima do cordão e respetiva amostra do ensaio LH8.5.

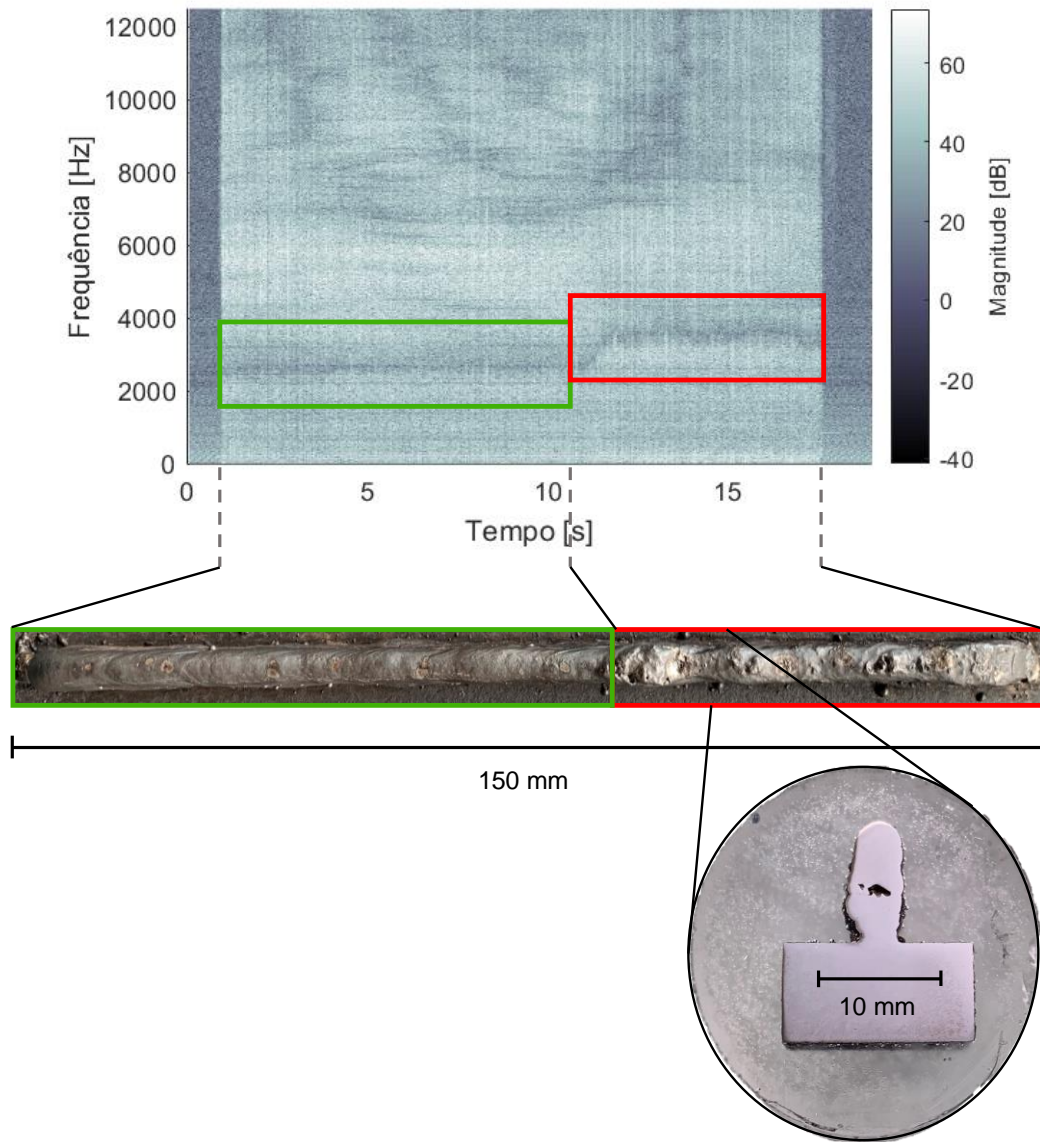


Figura 4.40: Gráfico STFT, vista de cima do cordão e respetiva amostra do ensaio LH9.5.

Como esperado, constata-se a translação da zona mais escura nos instantes em que se interrompe o gás de proteção, para as mesmas gamas de frequências identificadas nos ensaios com elevada entrega térmica. Por outras palavras, verifica-se que após a interrupção do gás, a zona do espectro da frequência com menor intensidade passa de valores perto 3000Hz para valores mais próximos de 4000Hz.

As amostras dos respetivos ensaios também apresentam poros na região da 5ª camada, comprovando o observado nos gráficos STFT.

Passando para os ensaios onde se depositou pó de giz no substrato, apresentam-se a Figura 4.41, Figura 4.42 e Figura 4.43. As mesmas dizem respeito à respetiva amostra e vista de aproximação da microestrutura da 5ª e 2ª camadas dos ensaios LH10, LH11 e LH12.

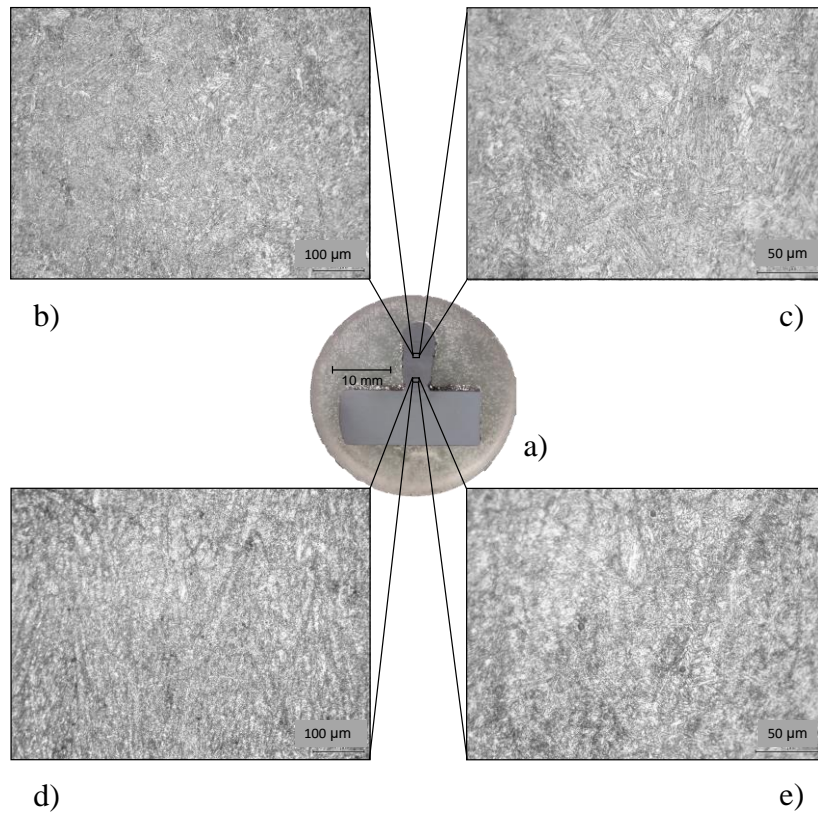


Figura 4.41: a) Amostra do ensaio LH10. b) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (100 μm). c) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (50 μm). d) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (100 μm). e) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (50 μm).

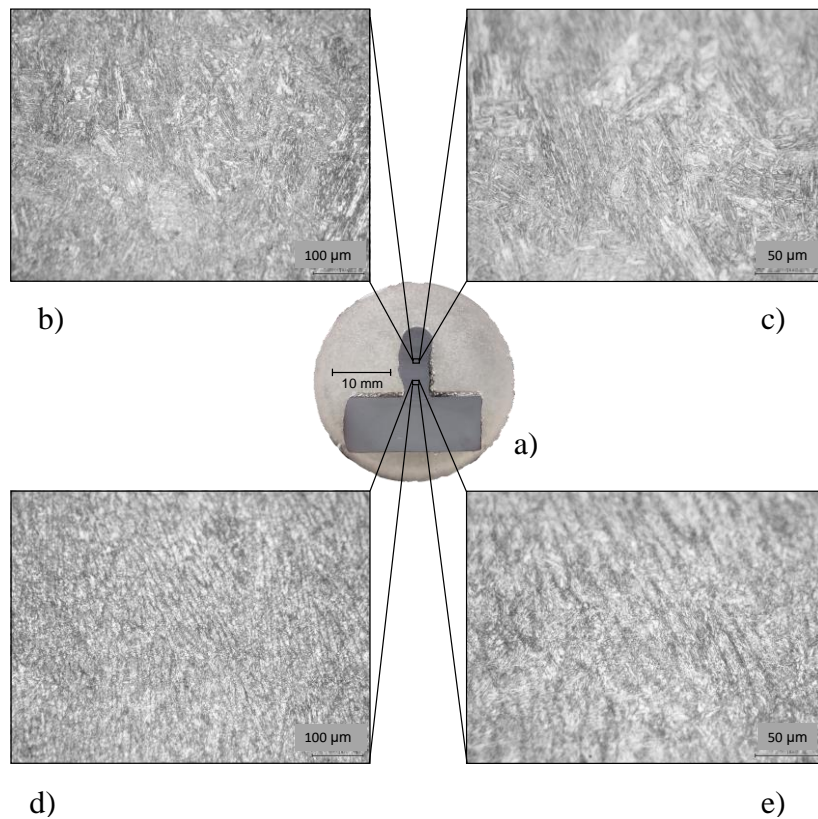


Figura 4.42 a) Amostra do ensaio LH11. b) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (100 μm). c) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (50 μm). d) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (100 μm). e) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (50 μm).

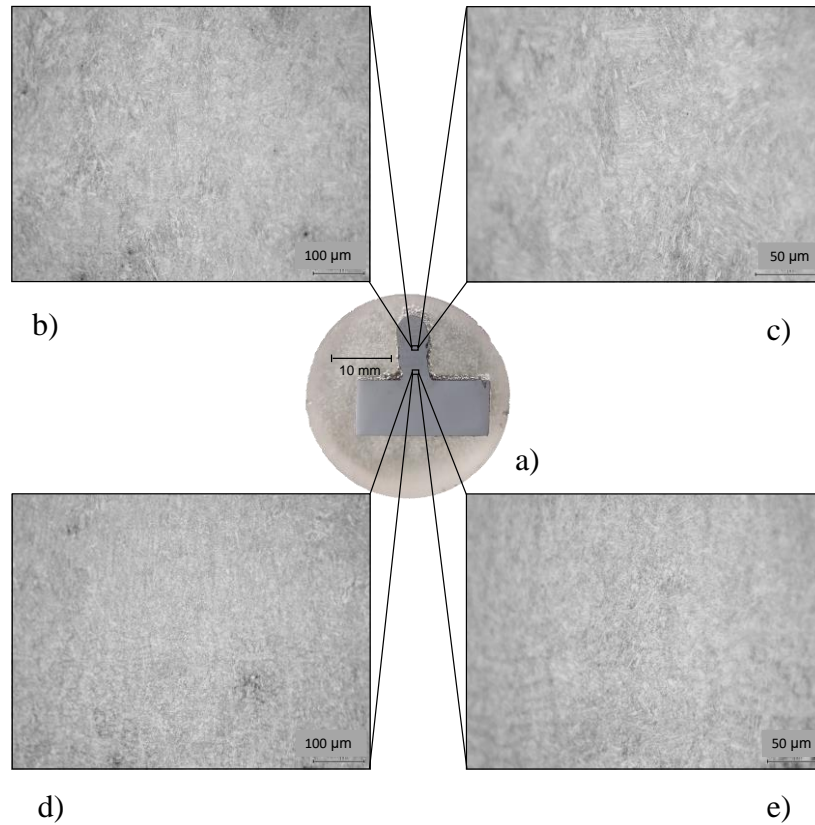


Figura 4.43: a) Amostra do ensaio LH12. b) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (100 μm). c) Vista de aproximação da microestrutura da 5ª camada (50 μm). d) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (100 μm). e) Vista de aproximação da microestrutura da 2ª camada (50 μm).

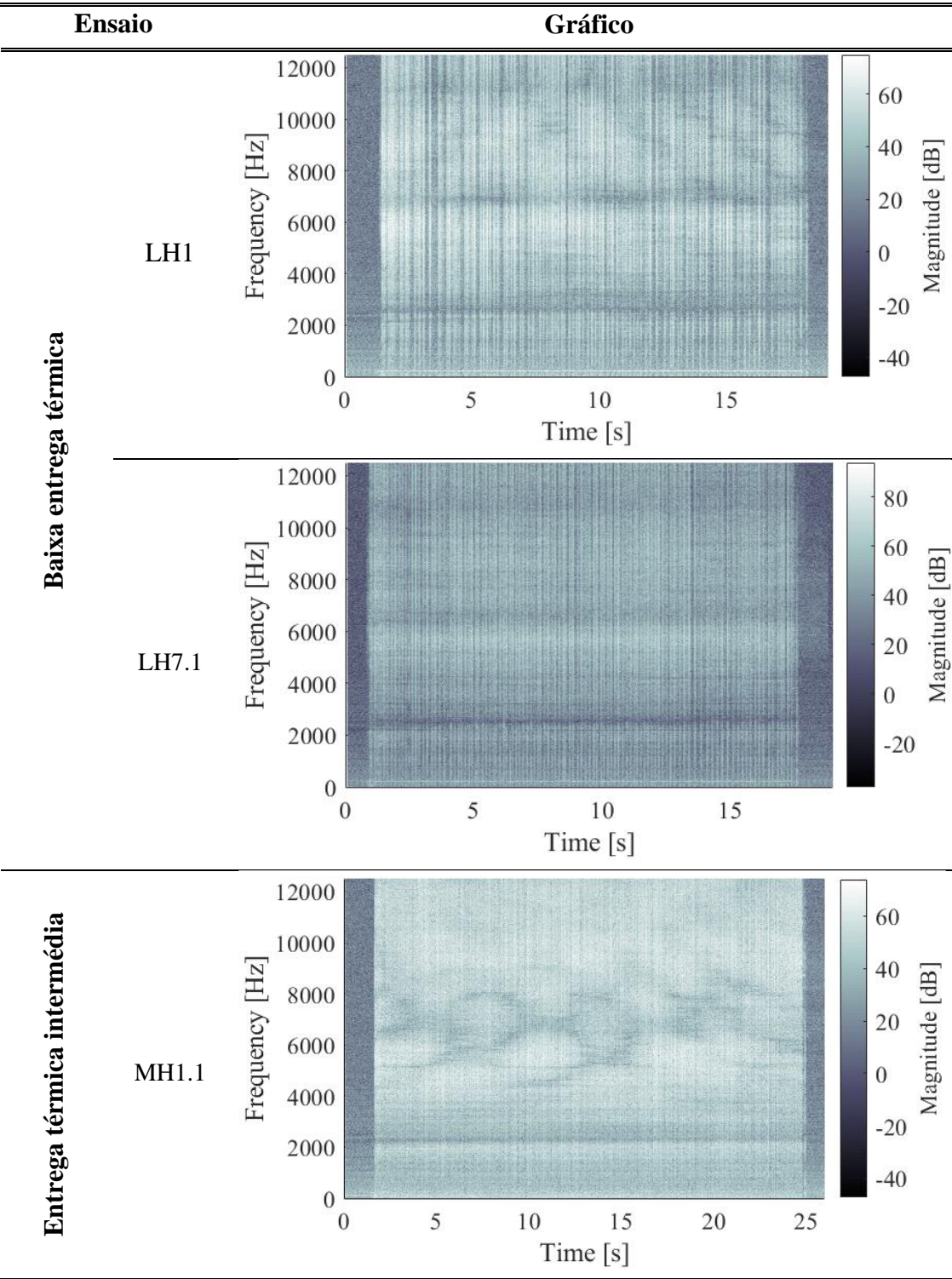
Assim como para os ensaios com elevada entrega térmica, não existem alterações visíveis entre a microestrutura da 2ª camada e da 5ª camada, comprovando a inexistência de alterações relacionados com o pó de giz no material.

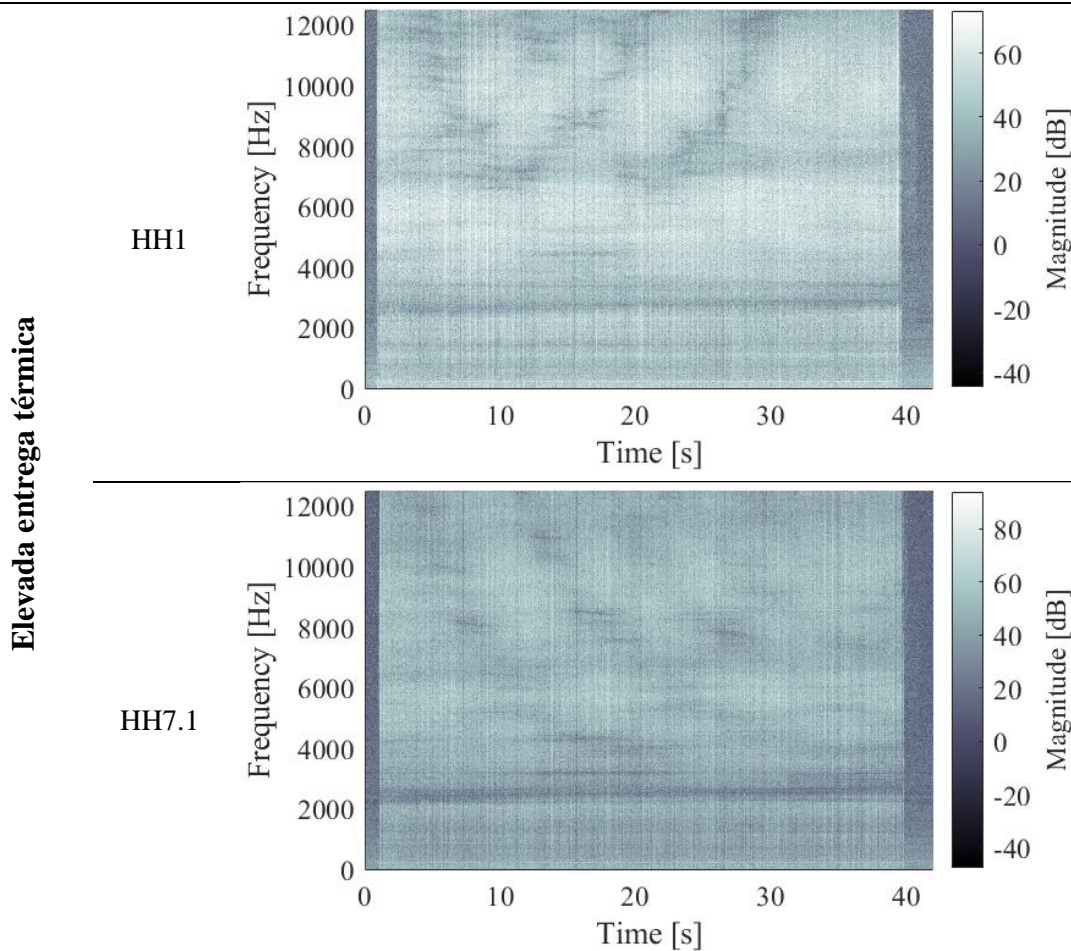
4.2.3. Influência dos Parâmetros do Processo e da Sobreposição de Camadas no Som

A boa interpretação de anomalias estará sempre dependente das considerações admitidas para uma deposição de referência. Uma vez que este processo funcionará segundo determinados parâmetros, torna-se pertinente identificar qual a influência dos mesmos no som produzido com vista a despistar a detecção de falsos defeitos. Na produção de uma parede composta por vários cordões, as variáveis que poderão influenciar a análise acústica são os parâmetros intrínsecos ao processo, que produziram maior ou menor entrega térmica, e o número de camadas que se efetuam.

Começando pela variação dos parâmetros associados à entrega térmica imposta no material, apresentam-se, na Tabela 4.1 os gráficos STFT relativos à deposição do primeiro cordão dos ensaios para as respetivas entregas térmicas.

Tabela 4.1: Gráficos STFT dos ensaios LH1, LH7.1, MH1.1, HH1 e HH7.1.





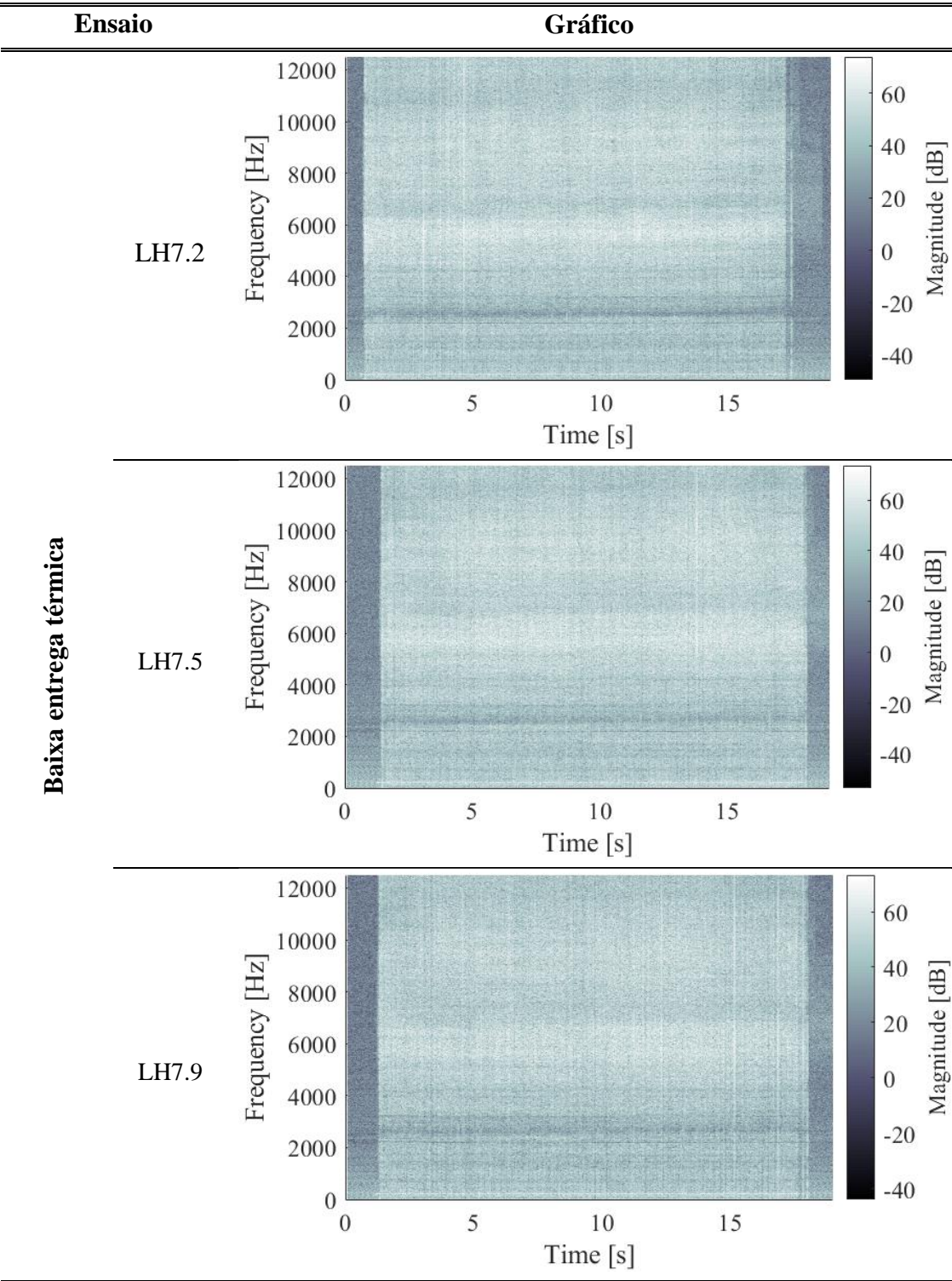
Ao observar os gráficos relativos aos ensaios de baixa entrega térmica repara-se numa interrupção sistemática do sinal ao longo do tempo. Passando para os gráficos relativos aos ensaios de intermédia e elevada entrega térmica, este fenómeno deixa de ser evidente.

Recordando que existem diferentes modos de transferência de material e que as variáveis que os originam são os parâmetros do processo, depreende-se que o aparecimento, ou não, deste fenómeno poderá estar diretamente relacionado com o modo de transferência de material.

Curiosamente, este fenómeno de interrupção do sinal é semelhante ao verificado em ensaios com elevada entrega térmica onde se depositou pó de giz no substrato. Este reparo justifica a importância da deteção da influência dos parâmetros do processo no som, uma vez que um sinal típico da deposição de material com baixa entrega térmica poderá ser confundido com impurezas no substrato que impedem a formação do arco elétrico.

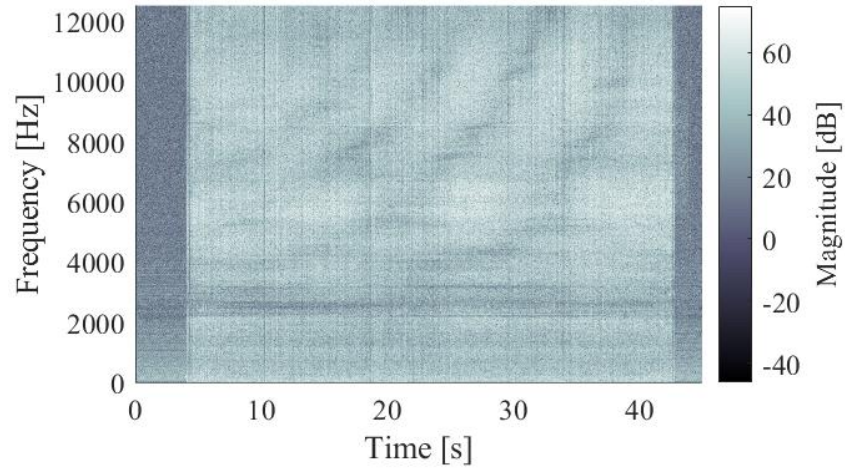
Passando agora para interpretação da influência do número de camadas no som produzido, na Tabela 4.2, expõem-se os gráficos relativos à deposição da 2^a, 5^a e 9^a camadas dos ensaios LH7 e HH7.

Tabela 4.2: Gráficos STFT dos ensaios LH7.2, LH7.5, LH7.9, HH7.2, HH7.5 e HH7.9.

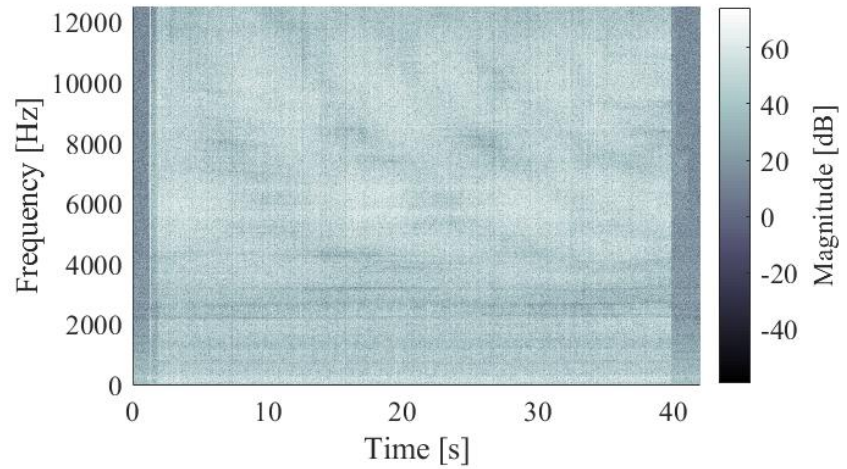


Elevada entrega térmica

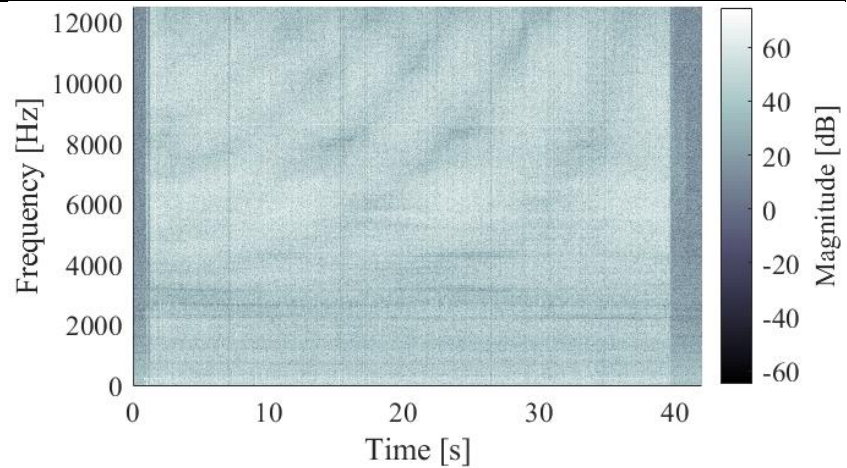
HH7.2



HH7.5



HH7.9



Verifica-se que, para ambas as entregas térmicas, o fenómeno referido anteriormente deixa de existir logo a partir da 2ª camada. Tal acontece, pois na primeira camada o substrato ainda se encontra à temperatura ambiente, o que para o caso dos ensaios com baixa entrega térmica não permite a formação de um banho de fusão contínuo. Estas condições levam à deposição de gotas de material de forma espaçada ao longo do cordão. Quando se efetuam as camadas seguintes o substrato já se encontra a uma temperatura mais elevada que permite a formação de um banho de fusão regular.

Este resultado vem complementar as ilações retiradas sobre a influência dos parâmetros no fenómeno de interrupção sonora, pois o mesmo acontece de forma pouco significativa quando se trata de parâmetros que produzem uma elevada entrega térmica.

Outra forma de comprovar o sucedido é comparar o aspeto de um cordão com elevada entrega térmica com outro de baixa entrega térmica, assim como apresentado na Figura 4.44.

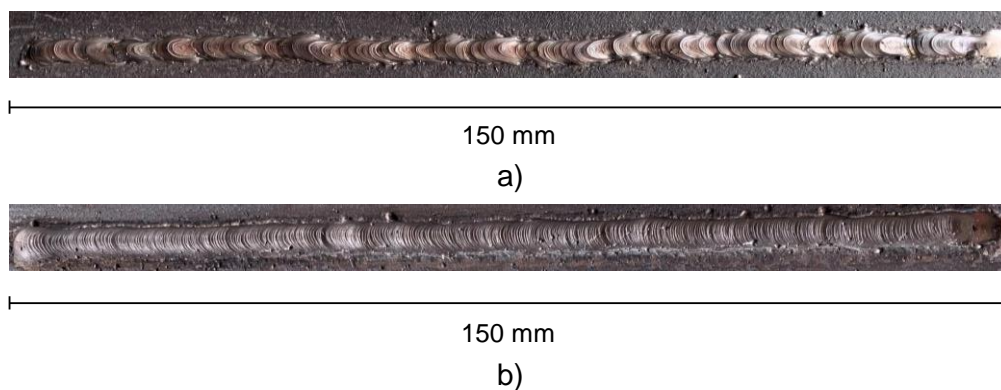


Figura 4.44: a) Cordão correspondente ao ensaio LH1. b) Cordão correspondente ao ensaio HH1.

Tal como previsto, constata-se uma deposição de material mais espaçada e irregular no cordão originado no ensaio LH1 quando comparado com o cordão relativo ao ensaio HH1.

Através da apresentação e discussão dos resultados conclui-se que a monitorização acústica corresponde a uma técnica com potencial para a deteção de defeitos no processo WAAM. Todas as conclusões retiradas neste trabalho encontram-se detalhadas no capítulo seguinte.

Capítulo 5. Conclusões e Trabalho Futuro

O desenvolvimento da presente dissertação teve como objetivo a detecção de defeitos na produção de peças através do processo WAAM, posto isto, no sentido lato, conclui-se que as intenções iniciais foram atingidas.

Particularizando e tendo por base os resultados obtidos, podem-se retirar as seguintes conclusões:

1. Através da captação do som proveniente do funcionamento de todos os sistemas envolvidos no processo, sem a criação de arco elétrico, reconheceram-se as frequências características dos seguintes sistemas: movimento dos motores no eixo y, movimento dos motores no eixo z, movimento do extrusor do eletrodo, exaustor e liberação de gás de proteção.
2. A metodologia aplicada permitiu identificar a formação de arco elétrico através dos picos de pressão sonora, o que pôde também ser comprovado através da relação com os picos de tensão e corrente elétrica envolvidos no processo.
3. Foi possível identificar a influência do gás de proteção no espectro sonoro, uma vez que a sua interrupção produziu uma variação na gama de frequências características do som emitido.
4. O som captado na produção de cordões com pó de giz no substrato apresentou interrupções sistemáticas ao longo do tempo, no entanto, não foram identificados defeitos fisicamente. Com este resultado verificou-se que a existência de impurezas no substrato, que não produzem defeitos significativos no aspeto final do cordão, podem ser detetados através da monitorização acústica
5. A elaboração de ensaios com diferentes parâmetros levou ao reconhecimento das consequências associadas à entrega térmica imposta no material. No caso da seleção de parâmetros que produziam baixa entrega térmica, o sinal sonoro apresentou interrupções sistemáticas ao longo do tempo, semelhantes ao verificado em casos com pó de giz no substrato. Este resultado foi importante para o despiste de falsos defeitos.
6. Foi possível comprovar a influência da deposição de camadas sucessivas na análise acústica. Conclui-se que o som emitido na deposição de uma camada pode não ser reproduzido igualmente em camadas posteriores.

Reunindo todos os resultados obtidos e reconhecendo que a pesquisa desenvolvida neste tema encontra-se ainda num estado embrionário, sugerem-se os seguintes temas para trabalho futuro:

1. Analisar o espectro de frequências para além do limite imposto pelo equipamento utilizado (12500Hz).
2. Perceber a origem das faixas escuras com forma e distribuição aleatória (formato de “nuvem”), verificadas nos gráficos STFT na gama de frequências entre 3000 Hz e 12500 Hz.
3. Aplicar a mesma metodologia experimental em diferentes materiais como: alumínio e superligas de níquel e perceber a influência do material no som produzido.
4. Desenvolver ensaios semelhantes para a inspeção de componente com geometrias diferentes da utilizada nesta dissertação. Este estudo será importante para a deteção da influência da geometria na produção de defeitos em zonas críticas.
5. Progredir na deteção de defeitos e estudar a aplicabilidade deste método na deteção da formação de fissuras. Para o sucesso deste estudo deveram ser utilizados outros materiais que produzem este tipo de defeitos.
6. Verificar a capacidade deste método para a deteção da formação de porosidades indesejadas.
7. Uma vez que os processos de manufatura aditiva fazem parte da ideologia associada à indústria 4.0, e dado o potencial de automatização deste método de inspeção não destrutiva, deverá ser desenvolvido um programa computacional que permita o funcionamento deste NDT de forma autónoma, sem depender da análise humana para a deteção de anomalias.

Referências

- [1] B. Wu, Z. Pan, D. Ding, D. Cuiuri, H. Li, J. Xu, J. Norrish, A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement, *J. Manuf. Process.* 35 (2018) 127–139. doi:10.1016/j.jmapro.2018.08.001.
- [2] S.K. Everton, M. Hirsch, P.I. Stavroulakis, R.K. Leach, A.T. Clare, Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing, *Mater. Des.* 95 (2016) 431–445. doi:10.1016/j.matdes.2016.01.099.
- [3] S.A.M. Tofail, E.P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O'Donoghue, C. Charitidis, Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities, *Mater. Today.* 21 (2018) 22–37. doi:10.1016/j.mattod.2017.07.001.
- [4] P. Doutora, R. Maria, M. Miranda, P. Associada, U. Nova, L. Co-orientador, M. Valdemar, R. Duarte, U. Nova, Tiago Miguel André Rodrigues Wire and arc additive manufacturing: equipment development and parts characterization, (2018).
- [5] S. Singh, S. Ramakrishna, R. Singh, Material issues in additive manufacturing : A review, *J. Manuf. Process.* 25 (2017) 185–200. doi:10.1016/j.jmapro.2016.11.006.
- [6] S.W. Williams, F. Martina, A.C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove, Wire + Arc Additive Manufacturing, *Mater. Sci. Technol.* 32 (2016) 641–647. doi:10.1179/1743284715Y.0000000073.
- [7] R. Baker, Method of making decorative articles, (n.d.).
- [8] N. Knezovi, WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURING (WAAM) - A NEW ADVANCE IN MANUFACTURING, 42 (2019) 0–7. doi:10.1007/978-3-319-90893-9.
- [9] F. Martina, S. Williams, Wire+arc additive manufacturing vs. traditional machining from solid: a cost comparison, (2015) 27.
- [10] G. Venturini, F. Montevecchi, A. Scippa, G. Campatelli, Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-crossing Features, *Procedia CIRP.* 55 (2016) 95–100. doi:10.1016/j.procir.2016.08.043.
- [11] S. Gholizadeh, A review of non-destructive testing methods of composite materials, *Procedia Struct. Integr.* 1 (2016) 50–57. doi:10.1016/j.prostr.2016.02.008.
- [12] A. Lopez, R. Bacelar, I. Pires, T. Santos, L. Quintino, MAPPING OF NON-DESTRUCTIVE TECHNIQUES FOR INSPECTION OF WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURING, in: J.F.S. Gomes, S.A. Meguid (Eds.), 7th Int. Conf. Mech. Mater. Des., INEGI/FEUP, 2017.
- [13] A.O. Brien, *Welding Handbook*, 9th ed., 2015. doi:10.1007/978-1-349-00324-2.
- [14] D. Ramos-Jaime, I.L.- Juárez, P. Perez, Effect of Process Parameters on Robotic GMAW Bead Area Estimation, *Procedia Technol.* 7 (2013) 398–405. doi:10.1016/j.protcy.2013.04.050.
- [15] V.R. Duarte, Additive manufacturing of a high resistance steel by MIG / MAG, (2016).
- [16] R. Krawczyk, Welding parameter ranges in relation to metal transfer method in welding arc Modes of Metal Transfer in Welding Arc, (2014).
- [17] E.F. Da Silva, M. José Rubens, A. Scotti, J.C. De Oliveira, Power quality analysis of gas metal ARC welding process operating under different drop transfer modes, COBEP 2011 - 11th Brazilian Power Electron. Conf. 1 (2011) 129–135. doi:10.1109/COBEP.2011.6085187.
- [18] P. Kah, H. Latifi, R. Suoranta, J. Martikainen, M. Pirinen, Usability of arc types in

- industrial welding, *Int. J. Mech. Mater. Eng.* 9 (2014) 1–12. doi:10.1186/s40712-014-0015-6.
- [19] A. Scotti, A Review on Special Metal Transfer Modes in Gas Metal Arc Welding, *Rev. Bras. Ciencias Mec. Brazilian Soc. Mech. Sci.* 20 (1998).
- [20] P.K. Palani, N. Murugan, Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding, 172 (2006) 1–10. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.07.013.
- [21] M.S. Węglowski, Y. Huang, Zhang Y. M., An Investigation of Metal transfer Process in GMAW, *Eng. Trans.* 56 (2008) 345–362.
- [22] Tranfer modes, (n.d.). https://www.oerlikon-welding.com/sites/oerlikon/files/styles/1115w/public/2016/12/06/scheme_mig_mag_transfer_modes_oerlikon.jpg?itok=dzFz0AQC.
- [23] J. Prezelj, J. Polajnar, I. Čudina, Monitoring Gas Metal Arc Welding Process by Using Audible Sound Signal, 57 (2011) 267–278. doi:10.5545/sv-jme.2010.181.
- [24] E.H. Cayo, S. Crisostomo, A. Alfaro, A Non-Intrusive GMA Welding Process Quality Monitoring System Using Acoustic Sensing, (2009) 7150–7166. doi:10.3390/s90907150.
- [25] D. Saini, S. Floyd, An Investigation of Gas Metal Arc Welding Sound Signature for On-Line Quality Control High-speed signal data acquisition and computer-aided analysis of sound signature may reveal conditions that generate weld defects, (1998) 172–179.
- [26] R.H. Horng, K.F. Chen, Y.C. Tsai, C.Y. Suen, C.C. Chang, Fabrication of a dual-planar-coil dynamic microphone by MEMS techniques, *J. Micromechanics Microengineering.* 20 (2010). doi:10.1088/0960-1317/20/6/065004.
- [27] M.A. Shah, I.A. Shah, D. Lee, S. Hur, Review Article Design Approaches of MEMS Microphones for Enhanced Performance, 2019 (2019).
- [28] W.S. Lee, S.S. Lee, Piezoelectric microphone built on circular diaphragm, *Sensors Actuators, A Phys.* 144 (2008) 367–373. doi:10.1016/j.sna.2008.02.001.
- [29] Microfone de cristal, (n.d.). <http://www.geocities.ws/saladefisica7/funciona/microfone50.gif>.
- [30] D.G. Costa, Microfones características e aplicações, *Power.* (2020).
- [31] R. Kressmann, M. Klaiber, G. Hess, Silicon condenser microphones with corrugated silicon oxide/nitride electret membranes, *Sensors Actuators, A Phys.* 100 (2002) 301–309. doi:10.1016/S0924-4247(02)00137-1.
- [32] D.T. Martin, Design, fabrication, and characterization of a MEMS dual-backplate capacitive microphone, PhD Thesis - Univ. Florida. Ph.D. (2007) 250. <http://purl.fcla.edu/fcla/etd/UFE0017526>.
- [33] Microfone condensador, (n.d.). <http://2.bp.blogspot.com/-RH4me2MlfEA/UKo51tdNYkI/AAAAAAAAAAws/wirhsxSTvGc/s1600/mic-condenser.gif>.
- [34] Z.G. Huang, S.J. Shiu, Design and analysis of diaphragms in dynamic microphones, *Adv. Mech. Eng.* 7 (2015) 1–13. doi:10.1177/1687814015595748.
- [35] Microfone dinâmico, (n.d.). <http://www.mediacollege.com/audio/images/mic-dynamic.gif>.
- [36] J.D. Molina, Metodologia TRIZ Aplicada ao Desenvolvimento do Conforto Acústico em Aeronaves Comerciais, (2013).
- [37] J.D. Cutnell, K.W. Johnson, PHYSICS, 7 th, Southern Illinois Univervity at Carbondale, n.d.
- [38] E. Kreyszig, ADVANCED ENGINEERING MATHEMATICS, n.d.
- [39] N. Kehtarnavaz, Digital Signal Processing System Design: LabVIEW-Based Hybrid Programming, n.d.